

DECLENCHEMENT DE PHONOREPONSES  
CHEZ CHORTHIPPUS BRUNNEUS (THBG.) ACRIDINAE\*

par R.-G. BUSNEL et W. LOHER \*\*

Laboratoire de Physiologie Acoustique,  
Institut National de la Recherche Agronomique, Jouy-en-Josas

## Sommaire

Les auteurs étudient une réaction dite de phonoréponse d'un insecte Orthoptère, le *Chorthippus brunneus* (Thbg.), à des signaux acoustiques artificiels produits par un générateur délivrant des signaux à pente d'attaque variable. Le nombre de réponses données par l'insecte est en relation étroite avec la forme de l'attaque du signal dont les variantes  $\Delta i/\Delta t$  ou l'angle  $\varphi$  constituent l'élément perçu déclencheur de la phonoréponse; celui-ci sera d'autant plus efficace qu'il sera de temps bref, ou d'angle  $\varphi$  plus près de  $90^\circ$ , appartenant donc typiquement à ce que l'on nomme les régimes transitoires.

Ces réactions sont du type obtenu sur une préparation neuromusculaire par un excitant mécanique, électrique ou chimique et obéissant donc aux lois générales de l'excitation physiologique, bien qu'elles se rapportent ici à un comportement psychophysiologique d'un animal «in toto».

## Zusammenfassung

Die Autoren untersuchten bei der Feldheuschrecke *Chorthippus brunneus* (Thbg.) den Antwortgesang auf künstliche Lautzeichen. Die Signale mit verschieden steiler Schallamplitude wurden von einem Generator erzeugt. Die Anzahl der vom Insekt gegebenen akustischen Reaktionen steht in direkter Beziehung zu dem Signalbeginn: die Variablen  $\Delta i/\Delta t$  oder der Anstiegswinkel  $\varphi$  sind die auslösenden Elemente der Antwort. Je kürzer die Zeitspanne, in der eine bestimmte Intensität erreicht wird, oder je mehr sich der Winkel  $\varphi$   $90^\circ$  nähert, um so wirksamer ist das künstliche Lautzeichen. Der Auslöser hat demnach einen typisch transitorischen Charakter. Diese Reaktionen sind solchen ähnlich, die von einem Nerv-Muskelpräparat durch mechanische, elektrische und chemische Reize ausgelöst werden; sie gehören den allgemeinen Gesetzen der Erregungsphysiologie, obwohl sie sich hier auf ein psychophysiologisches Verhalten des Tieres „in toto“ beziehen.

## Summary

In the Acridid *Chorthippus brunneus* (Thbg.), the authors studied the phonoresponses to artificial acoustic stimuli produced by a generator giving a variable attack. The number of responses by the insect is in direct relation to the form of the signal front; the releasing element being the quotient  $\Delta i/\Delta t$  or the angle of steepness  $\varphi$ . The shorter the time in which a given sound intensity is reached, or the closer the value of  $\varphi$  approaches  $90^\circ$ , the more effective is the artificial stimulus. The release has therefore a typical transitory character. These reactions are similar to those which are released in a nerve-muscle preparation by mechanical, electrical and chemical stimuli. The phonoresponses obey the general laws of physiological excitation, although they refer in this case to the psychophysiological behaviour of the insect "in toto".

## 1. Introduction

Nous avons démontré antérieurement que certaines réactions d'Orthoptères mâles ou femelles, de nature phonotaxique ou phonocinétique, pouvaient

\* Pour respecter les règles nouvelles de la nomenclature zoologique, nous précisons que, dans nos travaux antérieurs, le *Chorthippus brunneus* était désigné comme *Chorthippus bicolor* Charp.

\*\* Nouvelle adresse: Zoologisches Institut der Universität Tübingen.

être déclenchées avec des signaux acoustiques artificiels, en provenance de sifflets ou de générateurs de fréquence pure [1], [2], [3], [4], [6], [7], [10].

Ces études devaient nous conduire à préciser que dans certaines limites étendues, le facteur fréquence du signal artificiel n'avait pas un intérêt majeur pour l'insecte récepteur, mais que, par contre, pour un niveau compris entre 70 et 100 dB, supérieur à celui des émissions naturelles (35 à 47 dB pour *Chorthippus brunneus* Thbg. et 60 à 70 dB pour *Ephippiger bitterensis* Finot), c'était la forme de

l'enveloppe du signal et plus spécialement son attaque qui constituait le caractère réactogène essentiel [5].

En effet, nous avons montré que des signaux rectangulaires ou des clics de courte durée, dans les limites d'intensités indiquées, sont suffisants pour déclencher la réaction, alors que des signaux de même intensité, mais dans lesquels celle-ci croît très progressivement et lentement demeurent inefficaces [4].

C'est au phénomène d'attaque ou de fin de signal, dans lequel le niveau de l'intensité varie brusquement que nous avons appliqué le terme de transitoire; en fait, il s'agit du temps (vitesse) d'établissement du signal, à partir du niveau zéro, ou du temps de retour du signal au niveau zéro. On trouvera d'ailleurs une bonne étude des régimes transitoires, appliquée aux problèmes de perception musicale, dans le récent livre de WINCKEL [11].

L'analyse de tels signaux conduit en fait à la mesure du rapport  $\Delta i / \Delta t$ , l'angle  $\varphi$  variant selon la valeur de  $\Delta i$  et de  $\Delta t$ , sa formule pouvant d'ailleurs s'écrire  $\varphi = 1 / \sqrt{t^2 + t^2}$ , (Fig. 1).

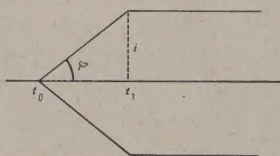


Fig. 1. Exemple schématique d'établissement progressif d'une grandeur pendant le temps, correspondant à l'installation temporelle du signal acoustique depuis l'instant  $t_0$  jusqu'à amplitude constante ( $i$ ) au temps  $t_1$  ( $\Delta t$  = temps s'écoulant entre  $t_0$  et  $t_1$ ).

Afin de vérifier à nouveau si la notion définie précédemment était valable expérimentalement, nous avons entrepris une série de recherches en utilisant des signaux dans lesquels on faisait varier l'angle  $\varphi$ .

Nous rappellerons, pour mémoire, que nos premiers résultats, établis notamment sur *Chorthippus brunneus* (Thbg.) (ex. *bicolor* Charp.) ♂, ont été obtenus avec des signaux dont  $\varphi = 90^\circ$ , avec des fréquences comprises entre 50 et 20 000 Hz, et un niveau sonore de l'ordre de 80 dB; l'insecte réagit au signal par l'émission d'une stridulation, dite de phonoréponse, qui n'est admise comme valable que lorsqu'elle a lieu dans

un temps très bref, de l'ordre de 0,7 à 1 s après le stimulus. Cette phonoréponse constituait donc le test de sensibilité psychophysiologique [10].

## 2. Méthode de travail

On a utilisé des signaux de fréquence pure, fixée à 10 000 Hz (bien que non préférentielle) d'intensité variable, de 65 à 90 dB au niveau de l'insecte récepteur.

Les Insectes étaient isolés dans un cylindre de plastique à fond de tulle, de 8 cm de diamètre et 4 cm de profondeur, afin qu'il n'y ait pas d'absorption du son par les parois, ni de réflexions, le cylindre étant mis dans l'axe du haut-parleur. Tous les essais ont été conduits au laboratoire sur des individus testés individuellement, à une température moyenne de  $25^\circ\text{C}$ , le bruit de fond d'ambiance étant de l'ordre de 45 dB.

Les signaux étaient délivrés par un générateur de signaux à pente variable, dont le schéma est donné dans la Fig. 2.

Ce générateur comprend: un pont (6, 8, 9, 10) auquel on applique la fréquence porteuse (en 4); des moyens de sortie (11, 14) connectés à ce pont et dans lesquels aucun signal n'est engendré normalement quant le pont est équilibré; un élément (10) disposé dans l'une des branches du pont et dont la résistance peut varier en fonction de la tension, appliquée à une entrée de commande (10) de cet élément; un condensateur (16) dont une plaque est connectée à la dite électrode de commande, l'autre plaque étant mise à la masse des circuits de charge et de décharge de ce condensateur qui entraînent un déséquilibre du pont lorsqu'ils sont actifs; et des

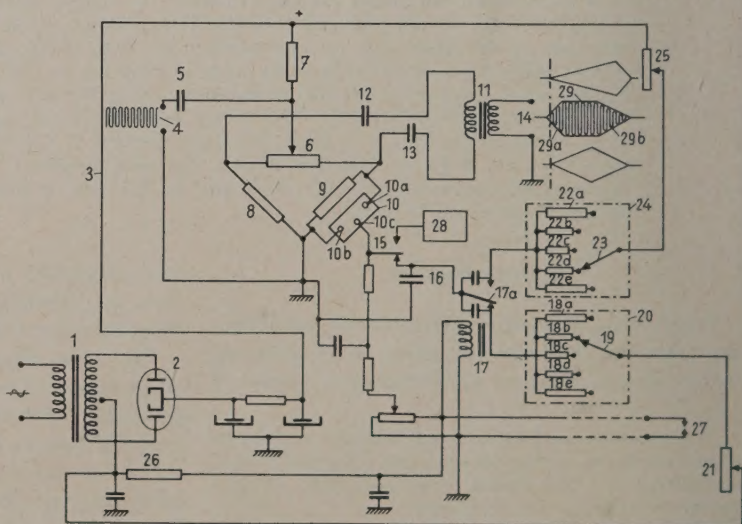


Fig. 2. Schéma du générateur de pentes variables.

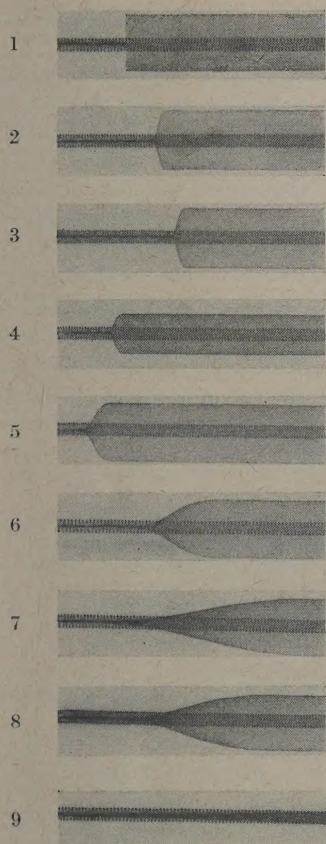


Fig. 3. Variantes de  $\Delta t$  en fonction de  $\Delta i$ , obtenues avec un générateur de pentes variables, lors de l'établissement d'un signal de 10 000 Hz. Dans ces expériences, la durée globale du signal variait, entre 0,1 et 2 s. La base de temps de tous ces oscillogrammes est de 450 Hz.

- 1 — valeur de  $\Delta t = 0$  ms,
- 2 — valeur de  $\Delta t = 2$  ms,
- 3 — valeur de  $\Delta t = 4$  ms,
- 4 — valeur de  $\Delta t = 4$  ms, pour une valeur de  $i$  plus petite,
- 5 — valeur de  $\Delta t = 10$  ms,
- 6 — valeur de  $\Delta t = 20$  ms,
- 7 — valeur de  $\Delta t = 60$  ms,
- 8 — valeur de  $\Delta t = 100$  ms,
- 9 — début de l'installation d'un signal dans lequel  $\Delta t$  atteindra 300 ms.

moyens (20-24) pour faire varier les constantes de temps de ces circuits de charge et de décharge de manière à recueillir à la sortie du pont des signaux (29) dont les flancs ont des pentes qui dépendent des constantes de temps des circuits de charge et de décharge.

A la sortie du générateur, on peut brancher soit une chambre de compression, soit un ionophone. L'intensité des signaux était mesurée avec un décibelmètre (L.E.A.).

### 3. Types de signaux obtenus

On peut avoir des signaux symétriques ou asymétriques, en réglant les potentiomètres d'entrée et de sortie. La durée des signaux utilisés dans les expériences était comprise entre 0,1 à 2 s. Les variables temporelles délivrées par le générateur de pente sont comprises entre 2 ms et 1000 ms, et l'on conçoit que, selon l'intensité du signal, l'angle  $\varphi$  variera pour un même temps.

Des exemples de ces différents signaux sont donnés dans la Fig. 3.

### 4. Caractères de la réaction de l'insecte

L'animal ne réagit pas au stimulus lorsqu'il est occupé à certaines activités biologiques telles que: nettoyage des antennes, des palpes ou des yeux, défécation, déplacements.

L'insecte ne réagit que lorsqu'il est immobile.

La réaction de l'insecte au stimulus consiste dans une émission sonore *normale*, pouvant être considérée comme ayant une valeur de signal pour un autre insecte de la même espèce. Chez cet animal, cette réaction, d'un point de vue neuro-musculaire, correspond à des mouvements de friction des pattes postérieures sur les élytres; elle ne peut être assimilable à une série de mouvements incoordonnés entraînant par surcroît la production d'un son. Il est important de noter que le stimulus, utilisé toujours isolément, peut déclencher plusieurs phonoréponses successives de l'insecte étudié; leur succession temporelle paraît incontrôlée, (en première analyse) et elles se suivent avec absence de rythme, au cours des quelques secondes qui suivent l'application du stimulus. On a pu en dénombrer jusqu'à 8. Dans les expériences, on a compté seulement une réponse

positive, quel que soit le nombre d'émissions par l'Insecte faisant suite à un stimulus. (Dans le comportement de rivalité acoustique entre 2 mâles, on a parfois noté des phénomènes analogues) [10].

## 5. Résultats. Etude de signaux symétriques

### 5.1. Variante: $\Delta t$ (Ces signaux ont une valeur de $\Delta t$ identique à l'entrée et à la fin du signal)

A titre d'exemple, pour une valeur  $\Delta i = 80$  dB, on a les résultats du tableau I.

Tableau I.

Valeur de $\Delta t$ ms	Nombre de stimuli	% de réponses positives
0	345	86
2	964	40
20	281	48
60	178	36
100	155	16
130	61	15
220	95	9,5
300	30	0

Autres exemples dans lesquels  $\Delta i = 70$  et 90 dB (Tableau II).

Tableau II.

Valeur de $\Delta t$ ms	Nombre de stimuli	% de réponses	$\Delta i$ dB
0	231	71	70
2	301	34	
20	174	17	
60	29	3	
2	297	42	90
20	112	64	
60	106	51	
100	132	30	
130	51	2	

### 5.2. Variante: $\Delta i$

Dans cet exemple, le facteur  $\Delta t = 2$  ms (Tableau III).

Tableau III.

Intensité dB	Nombre de stimuli	% de réponses positives
65	40	0
70	301	34
80	964	40
85	241	45
90	297	42
95	55	20
100	45	9,5

## 6. Etude statistique des résultats

Application du test de signification du  $X^2$ . Y-a-t'il une différence significative pour  $\Delta t = 2$  ms? A 70 et 90 dB,  $X^2 = 3,293$ ; significatif à  $P = 0,10$ , non significatif à  $P = 0,05$ . Pour  $\Delta t = 20$  ms à 70 et 90 dB,  $X^2 = 71,49$ . (Différence très significative à toutes les valeurs de P.) Pour  $\Delta t = 60$  ms, le test est inutile — la différence (70 dB = 1/29) 3% avec (90 dB = 54/100) 51% étant significative.

Les divers résultats analytiques sont condensés dans le tableau IV.

Pour les valeurs de  $\Delta t$  comprises entre 2 et 60 ms, l'intensité a-t-elle une influence sur le % de réponses positives? C'est-à-dire obtient-on un meilleur résultat à 90 dB qu'à 70 dB?:

Pour

$\Delta t = 2$  ms — pas d'influence de l'intensité ( $X^2 = \text{NS}$ )

$\Delta t = 20$  ms — influence nette de l'intensité ( $X^2 = S$ )

$\Delta t = 60$  ms — influence nette de l'intensité ( $X^2 = S$ )

c'est-à-dire meilleur résultat à 90 dB qu'à 70 dB.

## 7. Etude de signaux asymétriques

Ces valeurs, obtenues avec des signaux symétriques ayant donc une pente d'attaque analogue à la pente de fin de signal, nous ont conduit à vérifier, avec des signaux asymétriques, qu'une seule variation brusque suffirait pour déclencher la réaction, ce que nous avons obtenu déjà avec des signaux coupés sur une bande magnétique; nous avons utilisé cette fois le générateur à pente, avec une pente d'attaque ou de fin de signal ayant une valeur réactogène nulle, choisie supérieure ou égale à 220 ms.

Les valeurs expérimentales obtenues dans ces expériences avec une fréquence à 10 000 Hz, et une intensité de 80 dB, sont les résultats du Tableau V.

L'examen de ce tableau révèle que les pourcentages de réponses obtenus avec un signal asymétrique (un seul transitoire) débutant brusquement sont de même ordre que ceux obtenus avec un signal symétrique (2 transitoires). Toutefois, lorsque la variation brusque est à la fin du signal, le pourcentage de réponse, sans être négatif, diminue fortement.

Tableau IV. Résultats analytiques.

$\Delta t$ ms	Rapport + Total		% +		$X^2$	Conclusion
	70 dB	90 dB	70 dB	90 dB		
2	103/301	123/297	34	42	* à $P = 0,10$ NS à $P = 0,05$	non significatif
20	26/174	72/112	17	64	*** à $P = 0,01$	significatif

Tableau V.

Temps d'installation $\Delta t$	Temps de retour $\Delta t$	Nombre de signaux $\Delta t$	% de réponses positives
ms	ms	ms	
2	220	59	42
2	300	34	41
2	340	24	42
2	500	35	66
500	2	24	21
220	2	12	17

Nous aurons l'occasion de discuter dans d'autres travaux l'explication de ce dernier phénomène sur lequel nous ne nous étendrons pas ici.

### 8. Discussion

Les résultats apportés par ces expériences confirment, en tous points, ce que nous avons antérieurement décrit; ils précisent les limites dans lesquelles la pente du signal  $\Delta i/\Delta t$  est efficace. Ils confirment également, que, dans les exemples et les conditions précitées, même avec des intensités fortes, lorsqu'au lieu d'utiliser des transitoires plus ou moins marqués, le  $\varphi$  devient de plus en plus petit, ce qui correspond à une croissance ou à une décroissance très progressive du temps d'établissement de l'intensité, on n'obtient aucune réaction.

Le stimulus acoustique déclenche chez l'animal expérimenté «*in toto*» une réaction psychomotrice qui est la somme et le résultat des excitations neuromusculaires d'origine centrale, elles-même commandées par la réception périphérique. L'Invertébré, ici le *Chorthippus brunneus* (Thbg.) (et aussi l'*Ephippiger* étudié dans nos travaux antérieurs) peut être considéré comme un organisme ayant moins d'auto-détermination, c'est-à-dire moins de mécanismes régulateurs d'inhibition, donc moins de degrés de liberté que le Vertébré Supérieur, ce que confirment ses réactions de type forcé, tropistiques, dont on a peu ou pas d'exemples chez les Vertébrés Supérieurs de type Homéotherme notamment, et c'est probablement l'origine de cette réponse globale de tout l'organisme au stimulus, alors qu'on ne peut les observer que limitées aux axes neuro-musculaires chez le Vertébré Supérieur.

Ces réactions totales au stimulus acoustique répondent bien aux définitions générales obtenues sur les préparations neuro-musculaires par un excitant électrique, mécanique ou chimique, et il ne nous paraît pas inutile de les rappeler sommairement ici.

L'excitation, pour être efficace, nécessite une variation d'intensité de l'excitant, et il importe, de plus, que cette variation soit brusque. Si on considère la fermeture d'un circuit électrique, il faut que le courant débute brusquement, c'est-à-dire atteigne sa pleine valeur dans un temps très court; si l'éta-

blissement du courant est progressif, son efficacité diminue ou disparaît.

Les seuils d'excitation ou intensité liminaire peuvent être variables selon l'espèce étudiée. Il y a également des seuils supérieurs qui ne peuvent être dépassés.

Dans les limites des temps et des intensités indiquées dans nos expériences, nous pensons avoir apporté des arguments conduisant à la validité de ce point de vue dans le cadre des lois générales de l'excitabilité neuromusculaire auxquelles nous renvoyons.

Il paraît intéressant de préciser que par ses réactions, l'insecte semble percevoir le stimulus comme une information. Celle-ci n'est efficace, dans nos expériences, que si elle répond aux termes des lois de l'excitabilité neuromusculaire. Du point de vue acoustique, et au moins pour cet Invertébré, l'information est donc essentiellement perçue, dans ce type de signaux, (et dans les limites des essais et de la sensibilité aux seuils maxima et minima du système nerveux de l'animal) en fonction du rapport  $\Delta i/\Delta t$ .

Les réactions aux signaux acoustiques artificiels rapportés dans nos expériences et celles que nous avons soulignées antérieurement sur *Ephippiger* [9] notamment, sont tout à fait comparables aux réactions des mêmes Insectes aux signaux naturels de leur espèce. Toutefois, il semble important de souligner que les différences d'intensité entre stimulus artificiel et stimulus naturel paraissent impliquer que les mécanismes perceptifs ne sont peut-être pas identiques, même si les mécanismes centraux déclencheurs obéissent d'une même manière aux deux formes de stimuli.

(Reçu le 9 Mai 1960.)

### Bibliographie

- [1] BUSNEL, R.-G. et LOHER, W., Recherches sur le comportement de divers Acridoidea mâles soumis à des stimuli acoustiques artificiels. C. R. Acad. Sci. **237** [1953], 1557.
- [2] BUSNEL, R.-G. et LOHER, W., Recherches sur le comportement de divers mâles d'Acridiens à des signaux acoustiques artificiels. Ann. des Sc. Nat., Zool. **XIV** [1954], 271.
- [3] BUSNEL, R.-G. et DUMORTIER, B., Etude des caractères du signal du sifflet de Galton provoquant la phonotaxie de la femelle d'*Ephippiger bitterensis*. C. R. Soc. Biol. **148** [1954], 1751.
- [4] BUSNEL, R.-G., LOHER, W. et PASQUINELLY, F., Recherches sur les signaux acoustiques synthétiques réactogènes pour divers Acridinae mâles. C. R. Soc. Biol. **148** [1954], 1987.
- [5] BUSNEL, R.-G., Mise en évidence d'un caractère physique réactogène essentiel de signaux acoustiques synthétiques déclenchant les phonotropismes dans le règne animal. C. R. Acad. Sci. **240** [1955], 1477.

- [6] BUSNEL, R.-G., DUMORTIER, B. et PASQUINELLI, F., Phonotaxie de femelle d'Ephippiger (Orthoptère) à des signaux acoustiques synthétiques. C. R. Soc. Biol. **149** [1955], 11.
- [7] BUSNEL, R.-G., Etude de l'un des caractères physiques essentiels des signaux acoustiques réactogènes artificiels sur les Orthoptères et d'autres groupes d'Insectes. Insectes Sociaux **III** [1956], n° 1, 11.
- [8] BUSNEL, R.-G. et LOHER, W., Etude des caractères physiques réactogènes de signaux acoustiques artificiels déclencheurs de phonotropismes chez les Acridinae (Orthopt.). Bull. Soc. Entom., France **61** [1956], 52.
- [9] BUSNEL, R.-G., DUMORTIER, B. et BUSNEL, M.-C., Recherches sur le comportement acoustique des Ephippigères (Orthoptères, Tettigoniidae). Bull. Biol. Fr. et Belg. **90** [1956], fasc. 3, 219.
- [10] LOHER, W., Untersuchungen über den Aufbau und die Entstehung der Gesänge einiger Feldheuschreckenarten und den Einfluß von Lautzeichen auf das akustische Verhalten. Zt. für Vergleich. Physiol. **39** [1957], 313.
- [11] WINCKEL, F., Klangwelt unter der Lupe. Traduction française, Dunod, Paris [1960].

## DIE MESSTECHNISCHE ERMITTLUNG DER LAUTSTÄRKE VON BELIEBIGEN GERÄUSCHEN UNTER BERÜCKSICHTIGUNG DER EINFLÜSSE DES ZEITABLAUFES UND DER SPEKTRUMSFORM

von H. NIESE

Mitteilung aus dem Institut für Elektro- und Bauakustik der Technischen Hochschule Dresden

### Zusammenfassung

Aus den bekannten Gesetzen der Lautstärkebildung unter Berücksichtigung der Spektrumsform und der Zeitfunktion eines Geräusches wurde eine für die Nachbildung bei objektiven Lautstärkemessern geeignete Betrachtungsweise abgeleitet, die beide Einflüsse mit enthält und die Lautstärke von komplexen Geräuschen beschreibt.

Die einzelnen Gesetze der Lautstärkebildung wurden bisher unabhängig voneinander untersucht, indem ein Einfluß entweder durch die Wahl einer gleichförmigen Zeitfunktion oder einer schmalen Bandbreite, zur Ermittlung eindeutiger Aussagen, unterdrückt wurde. Komplexe Geräusche enthalten aber beide Einflüsse gemeinsam. So wurden im vorliegenden Aufsatz unter Verwendung bekannter Untersuchungsergebnisse die typischen Erscheinungen bei Wirkung des Einflusses der Geräuschespektrumsform und der Geräuschzeitfunktion wiedergegeben. Beide Einflüsse führen unabhängig voneinander zu einer Lautstärkevergrößerung gegenüber dem Geräuscheffektivwert. Es konnte eine Konzeption entwickelt werden, die die bekannten Einzelergebnisse zusammenfaßt, wonach sich die Gesamtlautstärke eines komplexen Geräusches aus drei Komponenten zusammensetzt. Der Hauptanteil der entstehenden Gesamtlautstärke wird von der sogenannten Basislautstärke wiedergegeben, die durch die Größe des frequenzbewerteten effektiven Schalldrucks entsteht. Hinzu treten unabhängig voneinander die Einflüsse des Geräuschespektrums und der Zeitfunktion, die getrennte Zuschläge zu der Basislautstärke erzeugen.

Zur meßtechnischen Erfassung der Wirkung der Geräuschzeitfunktion müssen die dynamischen Eigenschaften des Meßgerätes die Ohrträgheit nachbilden, so daß an Stelle des Geräuscheffektivwertes ein definierter Quasispitzenwert gemessen wird.

Für die Erfassung der Wirkung des Geräuschespektrums wird ein Verfahren vorgeschlagen, wonach mit dem gleichen Meßgerät unter Zwischenschaltung eines Oktavfilters die wichtigsten Merkmale des Geräuschespektrums ermittelt und zur Bestimmung des entsprechenden Lautstärkezuschlages benutzt werden. Dabei ist lediglich die Größe des maximalen, frequenzbewerteten Oktavpegels und die zugehörige Oktavmittenfrequenz zu bestimmen. Mit Hilfe eines Diagramms gelingt es, mit diesen Charakteristika und der Größe der Basislautstärke den Lautstärkezuschlag direkt abzulesen.

### Sommaire

D'après des recherches bien connues on montre que l'intensité d'un bruit complexe s'éloigne quelque peu de la valeur correctement calculée et dépend de la forme du spectre et de la fonction de temps. Ces deux influences sont indépendantes l'une de l'autre et produisent toujours des augmentations d'intensité. Pour expliquer l'effet de ces influences on a fait appel à certaines propriétés dynamiques particulières et l'on a, d'autre part, proposé un diagramme qui permet de déduire les augmentations de l'intensité sonore des caractéristiques des spectres.

## Summary

According to well-known investigations, it is shown that the loudness level of a complex noise differs from the weighted sound level and depends on the form of the spectrum and the function of time. These two influences are independent one from the other and always produce increases of the loudness level. In order to take into account the effect of the time function certain dynamic properties of the indicating instrument have been suitably fixed and, on the other hand, a diagram is proposed which allows to deduce the increases of the loudness level from the spectrum characteristics.

## 1. Einleitung

Die Lautstärke ist durch die Schallpegelwerte des 1000 Hz-Sinustones unter Einhaltung bestimmter Wiedergabebedingungen definiert. Die Lautstärke eines beliebigen Schallereignisses muß durch subjektiven Vergleich mit diesem Standardschall bestimmt werden. Zur Durchführung subjektiver Lautstärkevergleiche ist ein großer apparativer Aufwand und eine größere Zahl von Versuchspersonen notwendig. Die anwendbare Meßmethodik ist sehr zeitraubend und praktisch nur im Labor durchführbar. Für Betriebs- und Routinemessungen dagegen eignen sich nur Meßgeräte, die objektiv den Lautstärke-meßwert anzeigen. Ein solches Meßgerät muß die Lautstärkeempfindungsgesetze nachbilden, damit Meßwerte entstehen, die in subjektiver Übereinstimmung sind. Zur apparativen Nachbildung der Lautstärkeempfindungsgesetze ist natürlich deren Kenntnis Voraussetzung.

Zur Zeit der ersten Entwicklung eines derartigen objektiven Lautstärkemessers war bekannt, daß das Hörorgan eine frequenz- und pegelabhängige Empfindlichkeit gemäß den Verläufen der Kurven gleicher Lautstärke besitzt und daß die Lautstärke eine gewisse Aufbauzeit benötigt. Auf diesen Erkenntnissen fußend entstand in Deutschland der DIN-Lautstärkemesser, der heute gemäß ISO-Empfehlung im Prinzip unverändert als Standardmeßgerät im Weltmaßstab Anwendung finden soll. Der Wirkungsweise des Gerätes entsprechend wird praktisch aus dem vorliegenden Schalldruckablauf der der Hörempfindlichkeit angenäherte, frequenzbewertete effektive Schalldruck des Geräusches gebildet und in mehr oder weniger abgewandelten Lautstärkeeinheiten angezeigt. Diese Meßwerte wurden aus Mangel an Untersuchungsmaterial stillschweigend als dem subjektiven Urteil angenähert hingenommen. Inzwischen ergaben sich aus der Erfahrung der jahrzehntelangen Meßpraxis berechnete Zweifel über die Gültigkeit der so gewonnenen Meßwerte. Es zeigte sich nämlich in auffälliger Weise, daß besonders bei breitbandigen und impulsiven Geräuschen die ermittelten Meßwerte gegenüber dem Gehöreindruck zu klein erschienen. Offenbar werden mit solchen Geräten wichtige lautstärkebildende Geräuscheinflüsse nicht erfaßt. Darüber hinaus wurde bei der Messung kurz andauernder Einzelschallereignisse

bald erkannt, daß diese Geräte für die Lautstärkemessung derartiger Schallereignisse ungeeignet sind.

Wenn man heute trotz dieser betrüblichen Erfahrungen im Weltmaßstab ein Gerät sanktioniert, über das die Praxis und Wissenschaft längst das Urteil gesprochen hat, so stehen hierfür offenbar mehr wirtschaftliche Gesichtspunkte im Vordergrund. Mit der sich verdichtenden Erkenntnis über die großen Meßwertabweichungen gegenüber dem subjektiven Urteil einerseits und den Meßwertstreuungen bei der Anwendung von Geräten verschiedener Fabrikation andererseits wurde in dem Streben, nach genaueren Lautstärkemeßwerten zu gelangen, mit einer zielstrebigten Erforschung der Lautstärkebildungsgesetze begonnen. So beschäftigte man sich in mehreren Instituten mit dem Einfluß der Geräuschbandbreite auf die Lautstärkeempfindung. Aus den Ergebnissen vieler derartiger Einzeluntersuchungen konnte schließlich eine Konzeption der Lautstärkebildung entwickelt werden, bei der die inzwischen entdeckten „Frequenzgruppen“ eine wichtige Rolle spielen. Im Zuge der Entwicklung wurden aus diesen Erkenntnissen mehrere Lautstärkeberechnungsverfahren abgeleitet, wonach unter Verzicht auf ein spezielles Lautstärkemeßgerät aus vorliegenden Geräuschkurven der Lautstärkewert bestimmt werden kann. Obwohl das vorliegende Erfahrungsmaterial über die erzielbare Annäherung zwischen den so ermittelten Lautstärkewerten und den subjektiven Urteilen bei bestimmten Geräuscharten als zufriedenstellend angesehen werden kann, hat man erkannt, daß solche Methoden noch nicht alle wesentlichen Einflüsse der Lautstärkebildung erfassen können, da ein Spektrum keine Aussage mehr darüber enthält, welche Art der Geräuschzeitfunktion vorgelegen hat. Alle Autoren derartiger Lautstärkeberechnungsmethoden sind sich über diesen Tatbestand einig und schränken deshalb die Anwendung ihrer Verfahren auf Dauergeräusche mit gleichförmigem Geräuschcharakter ein.

Nun sind aber in der Meßpraxis gleichförmige Geräusche wesentlich seltener anzutreffen als impulsive Geräusche oder Geräusche mit statistischer Spitzenhaltigkeit, wenn man darüber hinaus von einmaligen kurzzeitigen Geräuschformen ganz absieht. Sie alle tragen auf Grund ihres Zeitablaufes einen weiteren Einfluß auf die Lautstärkeempfindung in sich, der die Lautstärke gegenüber dem Geräusch-

effektivwert vergrößert in Erscheinung treten läßt. Die Erforschung dieses Einflusses hat gezeigt, daß zum Zwecke der Lautstärkemessung bei genügender Näherung an das subjektive Urteil dem Meßgerät eine definierte Anzeigetragheit gegeben werden muß, die wesentlich kleiner ist als bei üblichen Lautstärkemessern.

Weitere Untersuchungen mit Geräuschen, bei denen gleichzeitig die beiden lautstärkevergrößernden Einflüsse der Spektrumsform und der Zeitfunktion wirksam waren, haben gezeigt, daß beide Lautstärkezuschläge weitestgehend unabhängig voneinander sind und sich linear zu einer „Basislautstärke“ addieren. Die Basislautstärke ist dabei der Wert, der durch den frequenzbewerteten Geräuscheffektivwert gebildet wird und mit üblichen Lautstärkemessern großer Anzeigetragheit angezeigt wird. Diese Erkenntnisse erlauben schließlich die Lautstärkebildungsgesetze so darzustellen, daß sie für die Nachbildung bei der objektiven Lautstärkeermittlung geeignet sind.

In letzter Konsequenz wäre es wünschenswert, wenn die Wirkungen aller wesentlichen lautstärkebildenden Geräuschkomponenten innerhalb eines Lautstärkemessers apparativ nachgebildet werden könnten, so daß direkte Meßwerte entstehen, die gemäß dem subjektiven Urteil der Lautstärkedefinition weitestgehend angenähert sind, ohne daß mit Hilfe einer rechnerischen oder zeichnerischen Methode gearbeitet werden muß. Nach den heutigen Erkenntnissen ist die Entwicklung eines derartigen Gerätes durchaus durchführbar. Natürlich wächst mit der Verfeinerung des Meßwertes auch der apparative Aufwand. Für die Erfassung des Einflusses der Geräuschzeitfunktion sind gegenüber der herkömmlichen Bauarten keine umfangreichen apparativen Zusätze erforderlich. Um jedoch gleichzeitig den Einfluß des Geräuschspektrums zu erfassen, wird leider der Aufwand so groß, daß er besonders für batteriebetriebene Geräte nicht mehr tragbar erscheint.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird die prinzipielle Ableitung der Lautstärkebildungsgesetze und deren geschlossene, für die Nachbildung geeignete Darstellung aufgezeigt, und es wird ein halbapparatives Meßverfahren beschrieben, mit dessen Hilfe es bei vermindertem Aufwand gelingt, die einzelnen Lautstärkekomponenten getrennt zu bestimmen. Hierzu wird ein Meßgerät vorgestellt, welches durch seine trägheitsarme Anzeige den Einfluß der Geräuschzeitfunktion zu messen erlaubt. Dazu wurde ein Diagramm entwickelt, welches aus den mit dem gleichen Gerät gemessenen Spektrumkennwerten den Einfluß der Spektrumform als Lautstärkezuschlag abzulesen gestattet.

## 2. Die Wirkung der Geräuschzeitfunktion und Bandbreite auf die Lautstärke

Sowohl die Wirkung der Geräuschzeitfunktion auf die Lautstärke als auch die der Geräuschbandbreite sind in einer Reihe von Arbeiten untersucht worden. Beide Wirkungen verschwinden, wenn ein gleichförmiges und gleichzeitig schmalbandiges Geräusch vorliegt. In diesem Fall bestimmt allein der frequenzbewertete effektive Schalldruck die Lautstärke. Als gleichförmiges Geräusch wird ein Geräuschzeitablauf verstanden, der keine hörbaren Lautstärkeschwankungen besitzt und als schmalbandiges Geräusch ist ein Geräusch mit einem Frequenzumfang von einer Frequenzgruppe zu verstehen. Sobald eines dieser Grenzmerkmale einer Geräuschform oder beide gleichzeitig nicht mehr erfüllt sind, entsteht eine gegenüber Geräuscheffektivwert vergrößerte Lautstärke. Beide Einflüsse wirken nur lautstärkeerhöhend.

### 2.1. Der Einfluß der Zeitfunktion

Durch eine Reihe subjektiver Lautstärkemessungen bei Darbietung von definierten, für die Lautstärkemessung interessierenden Geräuschen und Einzelschallereignissen konnte gezeigt werden, daß die Lautstärke weder vom Geräuscheffektivwert noch vom Spitzenwert bestimmt wird, sondern daß bei guter Annäherung an das subjektive Urteil ein bestimmter Quasispitzenwert des Geräusches oder Einzelschallereignisses maßgebend ist. Zur Messung dieses Quasispitzenwertes muß das Meßgerät eine definierte Anzeigetragheit erhalten. Durchgeführt wurden diese Untersuchungen mit einzelnen Sinuskurztonen variabler Dauer und verschiedener Frequenz [1], bei verschiedenen Darbietungspegeln [2] und bei der Wahl einer speziellen An- und Abklingfunktion [3]. Weiterhin wurde die Lautstärke von einzelnen Rauschimpulsen variabler Dauer bei verschiedener Mittenfrequenz und Bandbreite gemessen [3]. Darüber hinaus wurde die Lautstärke von kontinuierlichen, impulsiven Geräuschen untersucht; so von pulsförmig, mäanderförmig und sinusförmig modulierten Sinustönen bei variabler Modulationsfrequenz [4] und von Tonimpulsfolgen mit verschiedenen Dauertonteilen in Abhängigkeit der Pulsfrequenz [5].

Zur Darstellung der Wirkung des Geräuschzeitablaufes auf die Lautstärke ist im folgenden das Ergebnis einer derartigen Untersuchung beschrieben. Dargeboten wurde die in Bild 1 a gezeigte Geräuschform von Sinustonimpulsen mit konstanter Dauer der Einzelpulse von 5 ms. Variiert wurde die Pulsfrequenz  $f_P = 1/T$ , jedoch wurde der effektive Schalldruck des Gesamtgeräusches konstant gehalten. Durch Zwischenschaltung eines entsprechenden Fil-

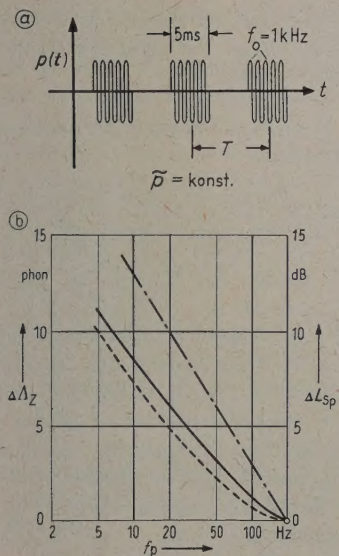


Bild 1. Subjektive Lautstärkemessung zur Bestimmung des Lautstärkezuschlages  $\Delta L_Z$ , infolge der Geräuschzeitfunktion nach [6].

- Zeitfunktion des zum Lautstärkevergleich dargebotenen pulsförmigen Geräusches mit konstantem Schalldruckeffektivwert  $\bar{p}$  und variabler Pulsfrequenz  $f_p = 1/T$ .
- Ergebnis der Untersuchung:
  - · — · — Zunahme des Geräuschspitzenpegels  $\Delta L_{Sp}$ ,
  - Lautstärkezunahme  $\Delta L_Z$ , subjektiv gemessen,
  - — — Lautstärkezunahme  $\Delta L_Z$ , die ein Meßgerät mit der Anzeigeträgheit von  $\tau_0 = 23$  ms anzeigt.

ters war dafür gesorgt, daß die Bandbreite des Gesamtgeräusches schmäler als die zugehörige Frequenzgruppenbreite blieb, so daß kein zusätzlicher Einfluß der Bandbreite auf die Lautstärke entstehen konnte. Das Ergebnis der Messung zeigt Bild 1 b. Über der Pulsfrequenz  $f_p$  ist die Lautstärkeerhöhung gegenüber dem Geräuscheffektivwert aufgetragen. Da sie allein durch die Wirkung der Geräuschzeitfunktion entsteht, ist sie als Lautstärkezuschlag  $\Delta L_Z$  bezeichnet. Das Diagramm ist nur bis zur Pulsfrequenz von 200 Hz sinnvoll, da hier die Periodendauer  $T$  gleich der Einzelpulsdauer von 5 ms wird und so ein Sinusdauerenton entsteht. Verringert man die Pulsfrequenz, so entstehen immer größere Zeitabstände der Einzelpulse und zur Einhaltung des konstanten Effektivwertes müssen die Amplituden der Einzelpulse im zunehmenden Maße erhöht werden. In Bild 1 b ist die notwendige Amplitudenvergrößerung als  $\Delta L_{Sp}$  strichpunktiert eingezeichnet. Die stark ausgezogene Kurve zeigt den Verlauf der Lautstärkezunahme  $\Delta L_Z$ . Man erkennt, daß der Lautstärkeverlauf weder dem konstanten Effektiv-

wert noch dem Geräuschspitzenwert  $\Delta L_{Sp}$  folgt, sondern zwischen beiden Werten verläuft, also von einem Quasispitzenwert wiedergegeben wird. Versucht man, das Ergebnis durch Vorgabe einer einfachen Anzeigeträgheit des Meßgerätes anzunähern, so erhält man mit der Zeitkonstante  $\tau_0 = 23$  ms den gestrichelt eingezeichneten Quasispitzenwertverlauf, den ein entsprechend dimensioniertes Meßgerät anzeigen würde. Auch bei allen vorgenannten Untersuchungen gelingt die Annäherung der Lautstärkeverläufe mit dem gleichen Quasispitzenwert, so daß allgemein geschrieben werden kann:

$$\Delta L_Z = 10 \log \frac{p_{D_{max}}^2}{\bar{p}_b^2}, \quad (1)$$

wobei  $p_{D_{max}}$  die Maximalwerte der frequenzbewerten und trägheitsbewerten Schalldruckzeitfunktionen kennzeichnet, also den Quasispitzenwert beschreibt und  $\bar{p}_b$  den frequenzbewerten effektiven Schalldruck darstellt.

Da übliche Lautstärkemeßgeräte eine zu große Anzeigeträgheit besitzen, wird mit diesen praktisch nur der Geräuscheffektivwert gemessen [6], und  $\Delta L_Z$  ist derjenige Anteil, um den der Meßwert gegenüber dem subjektiven Urteil zu klein ermittelt wird.

## 2.2. Der Einfluß der Bandbreite

Eine große Anzahl von Untersuchungen [7], [8], [9], [10], [11] befaßt sich mit dem Einfluß der Geräuschbandbreite auf die Lautstärke. Hierbei wurde im Gegensatz zu den vorangenannten Untersuchungen mit gleichförmigen Geräuschen gearbeitet, also der Einfluß der Zeitfunktion ausgeschaltet. Es zeigte sich bei allen Untersuchungen, die entweder mit Bandpaßrauschen variabler Bandbreite und verschiedener Mittenfrequenz oder mit schmalen Rauschbändern veränderlichen Frequenzabstandes durchgeführt wurden, daß bei kleinen Bandbreiten bzw. Frequenzabständen die Lautstärke dem Geräuscheffektivwert entspricht, bei größeren Bandbreiten oder Frequenzabständen jedoch eine vergrößerte Lautstärke entsteht. Die genauere Untersuchung dieses allein aus dem Geräuschspektrum resultierenden Effektes ließ gewisse kritische Bandbreiten finden, mit deren Überschreitung im zunehmenden Maße eine Lautstärkeerhöhung einhergeht. Diese kritischen Bandbreiten werden „Frequenzgruppen“ genannt. Ihre Frequenzbreiten sind von der Bandmittenfrequenz abhängig. Die Größe der Lautstärkeerhöhung gegenüber dem Geräuscheffektivwert ist vom Grad der Frequenzgruppenüberschreitung bestimmt und außerdem vom Darbietungspegel abhängig. Sie enthält bei mittleren Pegeln Maximalwerte um zu größeren und kleineren Pegeln hin zu verschwinden.

Ein Beispiel einer derartigen subjektiven Lautstärkeuntersuchung zeigt Bild 2. Dargeboten wurde Bandpaßrauschen variabler Bandbreite  $\Delta f$  bei einem mittleren Pegel und der Bandmittenfrequenz von etwa 1000 Hz. Auch hier wurde der Geräuscheffektivwert konstant gehalten, also mußten mit wachsender Bandbreite die Geräuschamplituden entsprechend vermindert werden, wie dies in Bild 2 a skizziert ist. Das Ergebnis der Messung als Lautstärkezuschlag infolge des Spektrumsumfanges  $\Delta A_{Sp}$  in Abhängigkeit von der Bandbreite  $\Delta f$  zeigt Bild 2 b. Man erkennt, daß bei kleineren Bandbreiten  $\Delta f$  als die Frequenzgruppe  $\Delta f_{gr}$  keine Lautstärkeerhöhung entsteht. Bei größeren Bandbreiten als  $\Delta f_{gr}$  jedoch ergibt sich in zunehmendem Maße der Lautstärkezuschlag  $\Delta A_{Sp}$  gegenüber dem Geräuscheffektivwert.

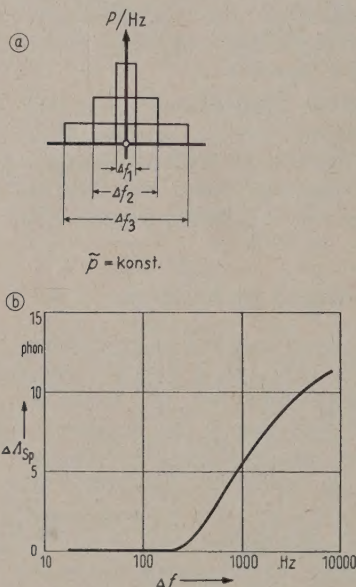


Bild 2. Subjektive Lautstärkemessung zur Bestimmung des Lautstärkezuschlages  $\Delta A_{Sp}$  infolge der Geräuschbandbreite nach [8].

- Spektrumdarstellungen der zum Lautstärkevergleich dargebotenen gleichförmigen Geräusche, mit konstantem Schalldruckeffektivwert  $\tilde{p}$  und variabler Bandbreite  $\Delta f$ .
- Ergebnis der Untersuchung.

Auf Grund der Pegel- und Mittenfrequenzabhängigkeit dieses Effektes läßt sich keine einfache mathematische Formulierung finden. Allgemein soll geschrieben werden:

$$\Delta A_{Sp} = 10 \log F(\Delta f), \quad (2)$$

wobei  $F(\Delta f)$  eine Funktion darstellt, die bei kleineren Bandbreiten  $\Delta f$  als  $\Delta f_{gr}$  den Wert 1 besitzt und bei größeren Bandbreiten jeweils eine solche Größe annimmt, daß der entsprechende Lautstärkezuschlag  $\Delta A_{Sp}$  entsteht.

Auch dieser Lautstärkezuschlag wird gemäß der Effektivwertbildung mit üblichen Lautstärkemeßgeräten nicht erfaßt.

### 2.3. Der gemeinsame Einfluß von Bandbreite und Zeitfunktion

Praktische Geräusche besitzen gewöhnlich neben einer beliebigen Spektrumform gleichzeitig auch eine mehr oder minder große Spitzenhaltigkeit. Es wirkt also sowohl der Einfluß der Geräuschbandbreite als auch der der Zeitfunktion, und es ergibt sich die Frage, welcher Lautstärkezuschlag ist hierbei zu erwarten? Zu dieser Frage lassen die Untersuchungen über die Bandbreiteabhängigkeit des Einflusses der Geräuschzeitfunktion bereits erkennen, daß beide Einflüsse weitgehend voneinander unabhängig sein müssen, da kein diesbezüglicher Zusammenhang beobachtet werden konnte [3]. Die spezielle Untersuchung dieser Frage wurde in [12] durchgeführt. Hierzu wurden wie unter 2.1 pulsförmige Geräusche mit einer Einzelpulsdauer von 5 ms gewählt und die Lautstärke subjektiv beurteilt. Ebenfalls wurde die Pulsfrequenz variiert und dabei der Geräuscheffektivwert immer konstant gehalten. Zur gleichzeitigen Einführung des Bandbreiteeffektes wurden hier an Stelle der pulsförmig modulierten Sinustöne pulsförmig getastete Rauschvorgänge benutzt, deren Bandbreiten für jede Meßreihe mit verschiedenen Größen vorgegeben wurden.

Das Ergebnis der Messung zeigt Bild 3. Aufgetragen ist der Lautstärkezuschlag  $\Delta A$ , der gegenüber dem Geräuscheffektivwert entsteht, in Abhängigkeit von der Pulsfrequenz  $f_p$ . Parameter ist die Geräuschbandbreite. Auch hier entsteht auf Grund der Einzelpulsdauer von 5 ms bei der Pulsfrequenz

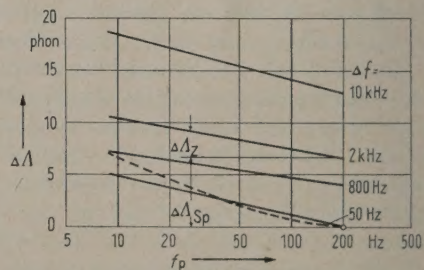


Bild 3. Ergebnis einer subjektiven Lautstärkemessung zur Bestimmung der gemeinsamen Lautstärkezuschläge  $\Delta A = \Delta A_Z + \Delta A_{Sp}$  infolge der gleichzeitigen Wirkung von Zeitfunktion und Bandbreite nach [12]. Zum Lautstärkevergleich wurden pulsförmige Rauschvorgänge mit konstantem Schalldruckeffektivwert  $\tilde{p}$  und variabler Pulsfrequenz  $f_p$  dargeboten. Parameter ist die Geräuschbandbreite  $\Delta f$ .

— — — Lautstärkezunahme  $\Delta A_Z$ , die ein Meßgerät mit der Anzeigeträgheit von  $\tau_0 = 23$  ms anzeigt.

von 200 Hz jeweils ein gleichförmiges Geräusch mit der entsprechenden Bandbreite. Bei dieser Pulsfrequenz ist der Einfluß der Bandbreite allein wirksam. Andererseits ist für die kleinste gewählte Bandbreite von  $\Delta f = 50$  Hz, gemäß  $\Delta f < \Delta f_{gr}$ , unabhängig von der Pulsfrequenz, nur allein der Einfluß der Zeitfunktion vorhanden. Im Punkte  $f_p = 200$  Hz und  $\Delta f = 50$  Hz liegt ein schmalbandiges, gleichförmiges Geräusch vor und es darf gegenüber dem frequenzbewerteten Geräuscheffektivwert gar keine Lautstärkeerhöhung entstehen.

Man erkennt aus dem Diagramm (Bild 3), daß die Kurven für die verschiedenen Geräuschbandbreiten etwa als parallele Geraden verlaufen, und daß die Anteile von  $\Delta A_Z$  und  $\Delta A_{Sp}$  als Summe entstehen, so wie sie auch getrennt aus den Bildern 1 und 2 entnehmbar sind. Somit läßt sich für den gesamten Lautstärkezuschlag  $\Delta A$  mit Gl. (1) und Gl. (2) schreiben:

$$\Delta A = \Delta A_Z + \Delta A_{Sp} = 10 \log \frac{\tilde{p}_{b,2}^2}{\tilde{p}_0^2} + 10 \log F(\Delta f) \quad (3)$$

Dieser Summenzuschlag kann auf Grund der Wirkungsweise üblicher Lautstärkemessgeräte nicht im Meßwert erfaßt werden, und es entspricht der Erfahrung, daß besonders bei pulsartigen und breitbandigen Geräuschen die größten Meßwertabweichungen entstehen. Sie bilden lediglich den frequenzbewerteten Effektivwert, der erst zusammen mit diesen Lautstärkeauschlägen die Gesamtlautstärke ergibt.

Man erhält die Gesamtlautstärke  $A$  eines beliebigen Geräusches, wenn man den frequenzbewerteten Schallpegel

$$A_B = 10 \log \frac{\tilde{p}_b^2}{\tilde{p}_0^2},$$

mit  $\tilde{p}_b$  = frequenzbewerteter effektiver Schalldruck und  $\tilde{p}_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ N/m}^2$  = Bezugsschalldruck, der „Basislautstärke  $A_B$ “ genannt werden soll, zu den Lautstärkezuschlägen  $\Delta A_Z$  und  $\Delta A_{Sp}$  hinzufügt. Es wird

$$A = A_B + \Delta A_Z + \Delta A_{Sp}, \quad (4)$$

mit 
$$A_B = 10 \log \frac{\tilde{p}_b^2}{\tilde{p}_0^2},$$

$$\Delta A_Z = 10 \log \frac{\tilde{p}_{D, \max}^2}{\tilde{p}_b^2}, \quad \Delta A_{Sp} = 10 \log F(\Delta f).$$

Faßt man die Basislautstärke  $A_B$  und die Lautstärkezuschläge  $\Delta A_Z$  und  $\Delta A_{Sp}$  unter einem Logarithmus zusammen, so ergibt sich

$$A = 10 \log \frac{\tilde{p}_{D, \max}^2 F(\Delta f)}{\tilde{p}_0^2} = 10 \log \frac{J_{D, \max} F(\Delta f)}{J_0} \quad (5)$$

Hiernach wird die Gesamtlautstärke  $A$  von der fiktiven Schallintensität  $J_{D, \max} F(\Delta f)$  gebildet, wobei der Einfluß der Zeitfunktion durch den Quasispitzenwert der Schallintensität  $J_{D, \max}$  berücksichtigt ist und der Einfluß des Spektrumumfanges durch die multiplikativ verknüpfte Funktion  $F(\Delta f)$  in die fiktive Intensität eingeht.

Die Lautstärkevergrößerung durch den Spektrumumfang wird so aufgefaßt, als wenn eine um den Faktor  $F(\Delta f)$  vergrößerte Intensität vorliegt, und die Lautstärkevergrößerung infolge der Wirkung der Zeitfunktion entsteht durch den gegenüber dem Effektivwert größeren Quasispitzenwert.

### 3. Die meßtechnische Ermittlung der Gesamtlautstärke

Gemäß der entwickelten und experimentell bestätigten Lautstärkebildungsgesetze, wonach die einzelnen lautstärkebildenden Einflüsse in drei Komponenten aufgespalten werden können, ist es zweckmäßig, diese drei Anteile nach Gl. (4) getrennt meßbar zu machen und nachfolgend zu den Gesamtlautstärkewert zu addieren. Es können damit auch die einzelnen Anteile getrennt mitgeteilt werden, so daß aus den Größen der Lautstärkezuschläge  $\Delta A_Z$  und  $\Delta A_{Sp}$  zusätzlich gewisse Informationen über die Spitzenhaltigkeit und den Spektrumumfang des gemessenen Geräusches gegeben sind.

Die Basislautstärke  $A_B$  wird ohnedies von jedem gebräuchlichen Lautstärkemesser angezeigt, wenn die Anzeigeschaltung eine genügende Trägheit zur Bildung des arithmetischen Mittelwertes, der quadrierten Meßgröße besitzt, also den Effektivwert bildet. Diese Bedingung erfüllen die meisten handelsüblichen Lautstärkemesser [6], beziehungsweise sie können leicht mit einer vergrößerten Anzeigetragheit versehen werden.

Die Basislautstärke  $A_B$  ist dann mit der Gesamtlautstärke  $A$  identisch, wenn die beiden Lautstärkezuschläge  $\Delta A_{Sp}$  und  $\Delta A_Z$  zu Null werden, wenn es sich also um ein gleichförmiges, schmalbandiges Geräusch handelt.

#### 3.1. Die Messung des Lautstärkezuschlages infolge der Zeitfunktion

Der Lautstärkezuschlag  $\Delta A_Z$  infolge der Geräuschzeitfunktion ergibt sich nach Gl. (1) und Gl. (4) aus dem logarithmischen Verhältnis vom Maximalwert des frequenz- und trägheitsbewerteten Quadrats des Schalldruckverlaufes zu dem Quadrat des frequenzbewerteten Schalldruckeffektivwertes. Der Wert von  $\tilde{p}_{D, \max}^2$  kann ebenfalls mit dem Lautstärkemessgerät für die Basislautstärke gebildet werden, wenn durch Einführung der definierten Anzeigetragheit mit der Zeitkonstanten von  $\tau_0 = 23$  ms nach dem quadrati-

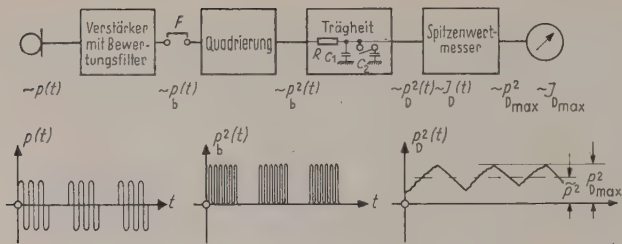


Bild 4. Schema für den Aufbau eines Lautstärkemessers, der die Lautstärkezuschläge  $\Delta A_Z$  und  $\Delta A_{Sp}$  zu ermitteln gestattet.

schen Glied die entstehenden Maximalwerte festgehalten werden. Das geschieht am einfachsten, wenn die Anzeigetragheit von einem großen Wert auf den definierten Wert umschaltbar ausgelegt wird. Mit der großen Trägheit wird der Effektivwert gebildet, also die Basislautstärke gemessen und nach Umschaltung auf die kleinere definierte Trägheit gibt die Differenz zu dem bei spitzenhaltigen Geräuschen entstehenden vergrößerten Ausschlag direkt den Lautstärkezuschlag  $\Delta A_Z$ .

Leider besitzen gewöhnliche Anzeigeeinstrumente von Haus aus eine größere Trägheit als für die definierte trägheitsarme Anzeige erforderlich ist. Um dennoch übliche Anzeigeeinstrumente verwenden zu können, muß nach der elektrischen Einführung der definierten Trägheit eine Zeitdehnerschaltung für das Festhalten des Maximalwertes sorgen. Die Zeitdehnerschaltung, wie sie von Spitzenwertmessern her bekannt ist, kann natürlich ohne Fehler bei der Basislautstärkemessung mit großer Trägheit dem Anzeigeeinstrument vorgeschaltet bleiben, da hierbei ohnedies keine Maximalwerte entstehen. Es kann andererseits auch die Basislautstärke gleich mit dem Zeitfunktionszuschlag in einem Meßvorgang bestimmt werden, ohne daß die einzelnen Anteile getrennt abgelesen werden; denn gemäß

$$\begin{aligned} A_B + \Delta A_Z &= 10 \log \frac{\tilde{p}_b^2}{\tilde{p}_0^2} + 10 \log \frac{p_{D_{\max}}^2}{\tilde{p}_b^2} = \\ &= 10 \log \frac{p_{D_{\max}}^2}{\tilde{p}_0^2} \end{aligned} \quad (6)$$

genügt es, von vornherein nur den mit der definierten Trägheit entstehenden Maximalwert zu messen. Es könnte also auf die Umschaltung auf große Anzeigetragheit verzichtet werden, jedoch ist die gleichzeitige Effektivwertmessung zur getrennten Ermittlung der Basislautstärke günstig und außerdem, wie unter 3.2 gezeigt, für die Bestimmung des Lautstärkezuschlages  $\Delta A_{Sp}$  infolge des Geräuschespektrums ohnedies notwendig.

Bild 4 zeigt ein Schema für einen Lautstärkemesser der dargestellten Art, das in den wesentlichen Elementen der herkömmlichen Bauart entspricht. Wie üblich, wird ein schalldruckempfindliches Mikrofon benutzt, dessen schalldruckproportionale Ausgangsspannung mit einem Wechselspan-

nungsverstärker verstärkt und gleichzeitig gemäß der frequenzabhängigen Ohrenempfindlichkeit frequenzbewertet wird. Danach folgt ein Buchsenpaar „F“, das gewöhnlich kurzgeschlossen bleibt, jedoch für die Ermittlung des Lautstärkezuschlages  $\Delta A_{Sp}$  infolge der Spektrumbreite zur Zwischenschaltung eines Filtersatzes dient. In der üblichen Art wird anschließend die Meßgröße quadratisch gleichgerichtet. Bei herkömmlichen Lautstärkemessern folgt hiernach direkt das Anzeigeeinstrument, das auf Grund seiner großen Trägheit den Mittelwert der quadrierten Größe, also den Effektivwert bildet.

Hier allerdings erweist es sich als zweckmäßig, die Trägheitseigenschaft elektrisch nachzubilden. Ein dem quadratischen Glied nachgeschaltetes einfaches  $RC$ -Glied mit der Zeitkonstante  $\tau_0 = RC_1 = 23$  ms erzeugt aus der quadratischen Meßgröße den trägheitsbewerteten, zeitabhängigen Verlauf  $p_D^2(t)$ . Durch Zuschaltung eines großen Kondensators  $C_2$  kann die Trägheit stark erhöht werden, so daß  $p_D^2$  zeitunabhängig wird und das Quadrat des Effektivwertes wiedergibt. Um mit einem Anzeigeeinstrument üblicher Trägheit die Maximalwerte  $p_{D_{\max}}^2$  des mit der definierten Zeitkonstante erzeugten Verlaufes  $p_D^2(t)$  zu messen, dient ein zwischengeschalteter Spitzenwertmesser, der die Maximalwerte jeweils solange festhält, bis sie das trägere Anzeigeeinstrument erreicht hat. Es entstehen somit Anzeigen, die mit zugeschaltetem Kondensator  $C_2$  dem Effektivwert, also der Basislautstärke  $A_B$  entsprechen, und bei abgeschaltetem  $C_2$  zeigt das Instrument den Quasispitzenwert, der Summe von  $A_B + \Delta A_Z$  entsprechend.

### 3.2. Die Ermittlung des Lautstärkezuschlages infolge des Spektrummfanges

Der Lautstärkezuschlag  $\Delta A_{Sp}$  infolge des Spektrummfanges eines Geräusches ist nach Gl. (2) und Gl. (4) von dem Funktionswert  $F(\Delta f)$  des zu messenden Geräusches abhängig. Der Funktionswert selbst wird in erster Linie von der Bandbreite des Geräusches bestimmt, ist aber daneben von der Mittenfrequenz bei bandförmigen Erregungen und vom Geräuschpegel abhängig. Bei nichtbandförmigen Geräuschespektren mit einem oder mehreren Maxima wird er außerdem von der Form des Spektrums,

entsprechend einer äquivalenten Bandbreite beeinflußt. Die Zusammenhänge erkennt man aus Bild 5. Aufgetragen ist nach [8] der Lautstärkezuschlag  $\Delta A_{Sp}$  gegenüber dem Schallpegel in Abhängigkeit von der Bandbreite  $\Delta f$  bei bandförmigen, gleichförmigen Erregungen für drei verschiedene Bandmittenfrequenzen  $f_m$  und verschiedene Schallpegel  $L$  bei der einen Mittenfrequenz von  $f_m = 1420$  Hz. Es zeigt sich generell, daß gemäß der Frequenzgruppeneinteilung der Lautstärkeanstieg über der Bandbreite mit Erhöhung der Bandmittenfrequenz bei größeren Bandbreiten beginnt, und daß er bei Mittenfrequenzen im mittleren Hörbereich die größten Werte erreicht. Andererseits erkennt man aus der dargestellten Pegelabhängigkeit bei der Mittenfrequenz von 1420 Hz, daß der Bandbreiteneffekt bei mittleren Pegeln am stärksten wirksam ist und bei großen (100 dB) und kleinen Pegeln (30 dB) wieder an Bedeutung verliert.

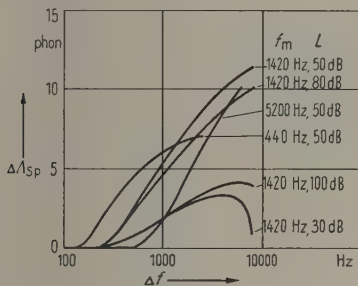


Bild 5. Ergebnisse subjektiver Lautstärkemessungen nach [8] zur Darstellung der Abhängigkeit von  $\Delta A_{Sp}$ . Zum Lautstärkevergleich wurden gleichförmige Rauschvorgänge mit verschiedenen Schallpegeln  $L$  und verschiedenen Mittenfrequenzen  $f_m$  bei konstantem Schalldruckeffektivwert  $\tilde{p}$  und variabler Bandbreite  $\Delta f$  dargeboten.

Gelingt es nun, einem vorliegenden Geräuschspektrum den Funktionswert  $F(\Delta f)$  auf definierte Weise zu entnehmen, so kann der Lautstärkezuschlag  $\Delta A_{Sp}$  auf Grund der bestehenden Relation direkt angegeben werden. Hierzu kann ein Diagramm dienen, welches alle die Abhängigkeiten, wie Bandbreite, Pegel und Bandmittenfrequenz besitzt und den Lautstärkezuschlag  $\Delta A_{Sp}$  abzulesen gestattet. Die Lautstärkezuschläge  $\Delta A_{Sp}$  sind gegenüber der Basislautstärke  $A_B$  immer kleine Größen. Sie vermindern sich ebenfalls, wenn die Basislautstärke vermindert wird (siehe Bild 5). Es kann daher ein Fehler der Ermittlungsmethode für die Gesamtlautstärke nicht von erheblicher Bedeutung werden und infolgedessen ist ein relativ einfaches Verfahren anwendbar. Auf alle Fälle muß man dem Geräuschspektrum die charakteristischen Eigenheiten entnehmen, also eine Frequenzanalyse durchführen. Den geringsten Aufwand verursacht eine Oktavanalyse.

Sie läßt erkennen, bei welcher Oktave der größte Pegel vorhanden ist, liefert also die Geräuschmittenfrequenz. Das Charakteristikum des Schallpegels des Geräusches ist durch die Messung der Basislautstärke  $A_B$  gegeben. Bei praktischen Geräuschspektren mit beliebigen Formen kann die Bandbreite nur durch einen Wert beschrieben werden, der eine äquivalente Bandbreite ausdrückt. Hierfür ist die Differenz zwischen frequenzbewertetem Gesamtpegel (= Basislautstärke) und frequenzbewertetem maximalen Oktavpegel geeignet. Sie ist unabhängig vom Pegel selbst und erhält für Geräusche von Oktavbreite und kleiner den Wert von 0 dB und für weißes Rauschen den Wert von 8 dB. Zwischen diesen beiden Grenzwerten lassen sich alle Spektren entsprechend ihrer äquivalenten Bandbreite einordnen. Bei Geräuschen im mittleren Pegelbereich und großen Differenzen zwischen Basislautstärke und maximalem bewerteten Oktavpegel entstehen die größten Lautstärkezuschläge  $\Delta A_{Sp}$ .

Streng genommen müßte für die Messung der Basislautstärke  $A_B$  und für die Durchführung der frequenzbewerteten Oktavanalyse eine Frequenzbewertung eingeführt werden, die für Geräusche mit ebener Wellenform genau den Kurven gleicher Lautstärke entspricht. Je nach vorliegendem Geräuschpegel müßte also auch die entsprechende Kurve gleicher Lautstärke zur Frequenzbewertung eingeführt werden. Das ist aber apparativ nur schwer möglich, und bei üblichen Lautstärkemessern begnügt man sich mit der Nachbildung der Kurven gleicher Lautstärke, indem man sich auf drei verschiedene derartige Kurven beschränkt, die drei entsprechenden Pegelbereichen zugeordnet sind. Neuerdings strebt man an, wegen der Schwierigkeiten, die bei Pegel im Überlappungsbereich entstehen, für bestimmte Geräuschgruppen nur eine einzige derartige Frequenzbewertungskurve anzuwenden. Es zeichnet sich ab, daß bei Lautstärkemessungen die „Bewertungskurve A“ mit Gültigkeit für kleine Geräuschpegel bevorzugt wird. Auch zur Entwicklung des Diagramms für die Ermittlung des Lautstärkezuschlags  $\Delta A_{Sp}$  ist es günstig, nur allein mit der Bewertungskurve A zu arbeiten. Die Basislautstärke ist dann immer der A-bewertete Geräuscheffektivwert und die Oktavanalyse erfolgt gleichfalls mit eingeschalteter A-Bewertungskurve. Bekanntlich werden tief-frequente Geräusche höherer Pegel durch die A-Bewertung zu sehr bedämpft, das heißt, die Basislautstärke erhält zu geringe Werte. Um dennoch mit der alleinigen A-Bewertung richtige Gesamtlautstärken  $A$  zu erhalten, muß der Lautstärkezuschlag  $\Delta A_{Sp}$  diese Unterbewertung ausgleichen. Man erhält andererseits die Vorteile, daß das Lautstärkemeßgerät nur allein für die Bewertung nach der A-Kurve ausgelegt werden kann, und vermeidet so, daß bei Pe-

geln im Überlappungsbereich mehrdeutige Meßwerte entstehen.

Weiterhin gelten die Kurven gleicher Lautstärke für die Frequenzbewertung nur im ebenen Schallfeld bei frontalem Schalleinfall. Im diffusen Schallfeld müssen andere Frequenzbewertungskurven zugrunde gelegt werden. Bei tiefen Frequenzen stimmen die Kurvenscharen für beide Feldformen überein, jedoch schon bei 1000 Hz müssen im diffusen Feld etwa um 3 phon größere Meßwerte entstehen, die bei sehr hohen Hörfrequenzen bis über 10 phon vergrößert angezeigt werden müssen. Um die A-Bewertung nur allein beizubehalten und trotzdem auch im diffusen Schallfeld richtige Meßwerte für die Gesamtlautstärke  $A$  zu erhalten, soll auch dieser Einfluß mit bei der Ermittlung von  $\Delta A_{Sp}$  erfaßt werden.

Aus den genannten Überlegungen und an Hand des vorliegenden Untersuchungsmaterials ist das in Bild 6 gezeigte Diagramm entstanden, das zur Bestimmung von  $\Delta A_{Sp}$  dient. Die Ordinate trägt den Maßstab für den gesuchten Lautstärkezuschlag  $\Delta A_{Sp}$  in phon, dessen Größe vom Schallpegel, von der Spektrumsbreite, von der Mittenfrequenz und der Schallfeldform des vorliegenden Geräusches abhängt. Die Höhe des Schallpegels ist durch den Abszissenmaßstab in Form des A-bewerteten Geräuscheffektivwertes entsprechend der Basislautstärke  $A_{B(A)}$  eingeführt. Die äquivalente Spektrumsbreite

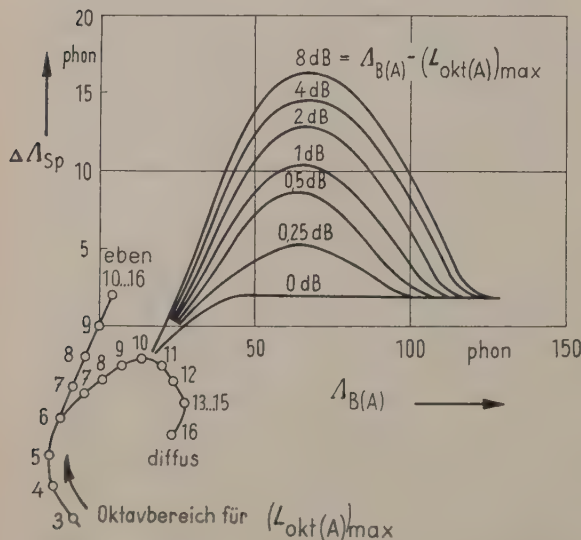


Bild 6. Diagramm zur Ermittlung von  $\Delta A_{Sp}$  aus den charakteristischen Größen des Spektrums, dem maximalen A-bewerteten Oktavpegel  $(L_{akt(A)})_{max}$ , der Kennzahl der Oktave, in der der maximale Pegel entsteht und dem A-bewerteten, effektiven Schalldruckpegel = Basislautstärke  $A_{B(A)}$ , für ebene und diffuse Schallfelder.

ist durch die Differenz zwischen Basislautstärke  $A_{B(A)}$  und dem maximalen A-bewerteten Oktavpegel  $(L_{akt(A)})_{max}$  als Parameter gegeben. Zur Berücksichtigung der Mittenfrequenz und der Feldform des Geräusches sind zwei Kurven mit der Beschriftung „eben“ und „diffus“ mit Gültigkeit für die entsprechende Feldform vorgesehen. Beide Kurven besitzen Punkte, deren Bezifferung die Oktave kennzeichnet, in der der maximale, A-bewertete Oktavpegel des Geräusches vorliegt. Diese Punkte geben den Koordinatenursprung für den Abszissen- und Ordinatenmaßstab an. Das mit dem Ursprung in Punkt „9, eben“ beispielsweise dünn eingezeichnete Koordinatensystem muß also je nach vorliegender Feldform und Mittenfrequenz entsprechend verschoben werden. Zweckmäßig ist es, wenn das Koordinatensystem allein auf transparentes Material gezeichnet wird, und somit auf das Kurvenblatt gelegt und beliebig angesetzt werden kann. Der Bezifferung für die Mittenfrequenzen liegen die aus Tabelle I ersichtlichen Oktavbereiche zugrunde.

Man erkennt aus dem Diagramm (Bild 6), daß bei breitbandigen Geräuschen mit mittleren Pegeln die größten Lautstärkezuschläge  $\Delta A_{Sp}$  entstehen und daß diese Zuschläge zu großen und kleinen Pegeln hin verschwinden; das heißt man kann bei solchen Pegeln überhaupt auf die Anwendung des Verfahrens verzichten und den Zuschlagswert  $\Delta A_{Sp}$  vernachlässigen. Das trifft für Basislautstärken  $A_{B(A)}$  von unter 30 phon und für solche von über 100 phon (Fluglärm) zu.

Aus den Verläufen der Kurven für den Koordinatenursprung bei ebener und diffuser Feldform ersieht man, daß die Zuschläge  $\Delta A_{Sp}$  bei mittleren Hörfrequenzen (Oktave 9 und 10) im diffusen Feld gegenüber dem ebenen Feld etwa 3 phon größer sind, und daß dieser Unterschied mit den Oktaven höherer Mittenfrequenz systematisch ansteigt, wie dies die Unterschiede der Kurven gleicher Lautstärke für beide Feldformen vorgeben.

Zur Bestimmung des Lautstärkezuschlages  $\Delta A_{Sp}$  wird in die Schaltung (Bild 4) an der Stelle „F“ ein Oktavfilter zwischengeschaltet und mit der Bewertungskurve A gemessen. Bei durchgeschaltetem Filter wird erst die Basislautstärke  $A_{B(A)}$  gemessen. Danach werden die Filterbereiche nacheinander eingeschaltet und der größte Oktavpegel festgehalten. Die Kennzahl dieser Oktave liefert je nach Feldform den Koordinatenursprung im Ermittlungsdiagramm (Bild 6). Die Differenz zwischen Basislautstärke  $A_{B(A)}$  und größtem Oktavpegel  $(L_{akt(A)})_{max}$  gibt die Kurve, mit der man über dem Abszissenwert der Basislautstärke  $A_{B(A)}$  den zugehörigen Lautstärkezuschlag  $\Delta A_{Sp}$  findet. Bei durchgeschaltetem Filter und der definierten Anzeigeträgheit kleiner Zeitkonstante läßt sich, wie unter 3.1. beschrieben, der

Tabelle I.

Die der Bezifferung der Mittenfrequenzen zugrundeliegenden Oktavbereiche (siehe Bild 6).

	1	2	3	4	5	6	7	8
$f_u \dots f_0$	35 ... 75 Hz	50 ... 100 Hz	75 ... 150 Hz	100 ... 200 Hz	150 ... 300 Hz	200 ... 400 Hz	300 ... 600 Hz	400 ... 800 Hz
	9	10	11	12	13	14	15	16
$f_u \dots f_0$	600 ... 1200 Hz	800 ... 1600 Hz	1,2 ... 2,4 kHz	1,6 ... 3,2 kHz	2,4 ... 4,8 kHz	3,2 ... 6,4 kHz	4,8 ... 9,6 kHz	6,4 ... 12,8 kHz

Lautstärkezuschlag  $\Delta A_Z$  messen, so daß sich die Gesamtlautstärke ergibt zu

$$A = A_{B(A)} + \Delta A_Z + \Delta A_{Sp}.$$

An Hand einer größeren Anzahl Ergebnisse subjektiver Lautstärkemessungen konnte das beschriebene Verfahren geprüft und den Ergebnissen anderer Lautstärkeberechnungsmethoden gegenübergestellt werden<sup>1</sup>. Als Testgeräusche wurden gleichförmige Geräusche mit unterschiedlichen Pegeln und Spektrumformen benutzt. Es zeigte sich, daß die Genauigkeit des Verfahrens trotz der Einfachheit genauso befriedigt, wie die der komplizierten Methoden [13], [14], [15]. Darüber hinaus kann andererseits das beschriebene Verfahren gegebenenfalls noch verfeinert werden, wenn durch Einführung von Terzanalysen, die der Oktavanalyse noch anhaftenden geringen Fehlereinflüsse beseitigt werden.

Die Aufnahme des Spektrums ist natürlich nur bei Dauergeräuschen möglich, wenn man nicht zu einer periodischen Wiederholung mit Hilfe von Schallträgern übergeht. Bei einmaligen kurzzeitigen Schallereignissen ist auch kein definierter Effektivwert als Basislautstärke meßbar. Hier kann allein mit kleiner definierter Trägheit (abgeschaltetem  $C_2$  in Bild 4) die Summe  $A_B + \Delta A_Z$  gemessen werden. Wie Gl. (6) hierzu zeigt, ist das aber naturgemäß der Wert, der die Lautstärke von einmaligen Schallereignissen kennzeichnet und von dem ausgehend die Herleitung der Zusammenhänge erfolgte [2], [4], [5]. Der Lautstärkezuschlag durch den Spektrumumfang  $\Delta A_{Sp}$  verliert bei kurzzeitigen Schallvorgängen ohnedies an Bedeutung und kann vernachlässigt werden, da zur Auslösung dieses Effektes in Form von Frequenzgruppenbildung erst längere Wirkungsdauern notwendig sind. Es bleibt aber zu erwägen, ob in diesen Fällen nicht doch eine unterschiedliche Frequenzbewertungskurve für verschiedene Pegel vorzuziehen ist.

<sup>1</sup> Ein Aufsatz, der die Messung und Berechnung von etwa 80 verschiedenen Geräuschen im diffusen Feld und etwa 70 Geräuschen im ebenen Feld beschreibt, ist in Vorbereitung.

3.3. Apparative Zusätze für übliche Lautstärke-meßgeräte

Um mit vorhandenen üblichen Lautstärkemeßgeräten, die von Haus aus nur die Basislautstärke  $A_B$  zu messen gestatten, auch die Zusatzkomponenten  $\Delta A_Z$  und  $\Delta A_{Sp}$  meßbar zu machen, sind gemäß Bild 4 apparative Zusätze notwendig.

Zur Ermittlung der Zuschlagkomponente  $\Delta A_{Sp}$  müssen am Gerät Buchsen vorgesehen werden (in Bild 4 mit „F“ gekennzeichnet), die das Einschleusen eines Oktavfilters gestatten. Unter Verwendung des Diagramms (Bild 6) läßt sich dann der Lautstärkezuschlag  $\Delta A_{Sp}$  finden.

Für die Messung des definierten Quasispitzenwertes  $p_{Dmax}$ , der die Komponenten  $A_B + \Delta A_Z$  zusammenfaßt, ist durch geeignete Schaltbuchsen das Anzeigement von der Quadrierschaltung zu trennen und ein „Spitzenwertmesser“ mit vorgeschaltetem „Trägheitsglied“ gemäß Bild 4 als apparativer Zusatz zwischenzuschalten. Der Anschluß des Zusatzgerätes muß an der Stelle im Gerät erfolgen, an der die unverformte, quadrierte Meßspannung anliegt.

Zur Prüfung der dynamischen Eigenschaften des Gesamtgerätes wird die Vorgabe einer toleranzbehafteten Kurve (siehe Tabelle II) vorgeschlagen, die die Anzeigespitzenwerte bei Kurztonbeschallung erreichen sollen. Eine derartige Vorschrift ist im Prinzip bereits zur Einhaltung von dynamischen Eigenschaften in den Normen-Empfehlungen für Lautstärkemeßgeräte enthalten. Sie ist dort allerdings nur durch die Angabe eines einzigen

Tabelle II.

Zahlentafel für die Prüfung der Anzeige mit Tonimpulsen ( $f=1000$  Hz) in Abhängigkeit von der Impulsdauer bei konstantem Spitzenwert der Kurztöne.

Impulsdauer ms	Anzeige dB	zulässige Abweichung $\pm$ dB
Dauerton	Vollausschlag	0
50	— 1,0	1,0
20	— 2,5	1,5
10	— 4,0	2,0
5	— 6,0	2,5

toleranzbehafteten Punktes festgelegt. Auf Grund der Einpunktangabe und des relativ großen Toleranzbereiches ist den Herstellern so große Freiheit gelassen, daß immer zu große Anzeigetragheiten gewählt werden und dann praktisch nur noch der Geräuscheffektivwert = Basislautstärke  $A_B$  gemessen werden kann [6].

Die in Tabelle II angegebenen Werte entsprechen der subjektiven Lautstärkeabnahme bei Verkürzung der Darbietungsdauer von Sinustönen [2], [6]. Sie werden mit dem vorgeschlagenen Schaltungsaufbau erreicht.

(Eingegangen am 23. Dezember 1960.)

#### Schrifttum

- [1] NIESE, H., Vorschlag für die Definition und Messung der Deutlichkeit nach subjektiven Grundlagen. *Hochfrequenztechn. u. Elektroakustik* **65** [1956], 4.
- [2] NIESE, H., Die Trägheit der Lautstärkebildung in Abhängigkeit vom Schallpegel. *Hochfrequenztechn. u. Elektroak.* **68** [1959], 26.
- [3] NIESE, H., Untersuchung zur geschlossenen Darstellung der Lautstärkebildungsgesetze bei beliebiger komplexer Geräuschanregung. *Hochfrequenztechn. u. Elektroak.* **70** [1961], 5.
- [4] NIESE, H., Untersuchung der Lautstärkeempfindung von rhythmischen Geräuschen. *Hochfrequenztechn. u. Elektroak.* **66** [1958], 115.
- [5] NIESE, H., Die Lautstärkeempfindung von rhythmischen Geräuschen sehr geringer Periodizität. *Hochfrequenztechn. u. Elektroak.* **67** [1958], 26.
- [6] NIESE, H., Das übliche und notwendige dynamische Verhalten objektiver Lautstärkemeßgeräte. *Hochfrequenztechn. u. Elektroak.* **69** [1960], 17.
- [7] FELDTKELLER, R. und ZWICKER, E., *Das Ohr als Nachrichtenempfänger*, S. Hirzel-Verlag, Stuttgart 1956.
- [8] ZWICKER, E., FLOTTROP, G. und STEVENS, S., Critical Band Width in Loudness Summation. *J. Acoust. Soc. Amer.* **29** [1957], 548.
- [9] BAUCH, H., Die Bedeutung der Frequenzgruppe für die Lautheit von Klängen. *Acustica* **6** [1956], 40.
- [10] FELDTKELLER, R. und ZWICKER, E., Die Lautstärke von gleichförmigen Geräuschen. *Acustica* **5** [1955], 309.
- [11] NIESE, H., Subjektive Messung der Lautstärke von Bandpaßrauschen bei gleichmäßig und unterschiedlich dargebotenen Bandbreiten für jedes Ohr zur Gewinnung von Hörgesetzmäßigkeiten und ihrer Nachbildung bei objektiver Lautstärkemessung. *Hochfrequenztechn. u. Elektroak.* **68** [1960], 202.
- [12] NIESE, H., Das Zusammenwirken der Einflüsse von Geräuschbandbreite und Geräuschzeitfunktion auf die Lautstärke. *Hochfrequenztechn. u. Elektroak.* (im Druck).
- [13] STEVENS, S. S., Calculation of the Loudness of Complex Noise. *J. Acoust. Soc. Amer.* **28** [1956], 807.
- [14] ZWICKER, E., Ein graphisches Verfahren zur Bestimmung der Lautstärke und der Lautheit aus dem Terzpegeldiagramm. *Frequenz* **13** [1959], 334.
- [15] KRYTER, K. D., Scaling Human Reactions to the Sound from Aircraft. *J. Acoust. Soc. Amer.* **31** [1958], 1415.

## ÜBER DIE WAHRNEHMBARKEIT MEHRERER RÜCKWÜRFE VON SPRACHSCHALL

von H.-P. SERAPHIM

III. Physikalisches Institut der Universität Göttingen

### Zusammenfassung

Für Sprachschall wird die Wahrnehmbarkeit eines Rückwurfes neben einem oder mehreren anderen Rückwürfen aus verschiedenen Richtungen untersucht. Das Ergebnis erlaubt eine Antwort auf die Frage, welche Rückwürfe eines Echogramms mit Sicherheit nicht wahrgenommen werden. An Hand der Ergebnisse wird die Möglichkeit einer elektroakustischen Nachbildung aller in einem Raum wahrnehmbaren Rückwürfe diskutiert.

### Summary

Utilizing speech sound, investigations were made on the perceptibility of a synthetic acoustical reflection in the presence of one or more additional reflections coming from various directions. The results lead to an answer to the question, which reflections in a room will not be perceptible at all. The possibility of a synthetic electroacoustical representation of the complete series of perceptible reflections in a room is discussed.

### Sommaire

On étudie la perceptibilité de la parole dans le cas d'une seule réflexion puis dans le cas de plusieurs réflexions provenant de directions diverses. Les résultats donnent une réponse à la question de savoir quelles sont, sur un diagramme d'écho, les réflexions qui sont certainement imperceptibles dans une salle. Ils permettent de discuter la possibilité d'une représentation électroacoustique de la série complète des réflexions perceptibles.

## 1. Einleitung und Übersicht

Für die Vorausbestimmung der akustischen Eigenschaften eines Raumes bedient man sich gegenwärtig zweier Verfahren. Entweder berechnet man für den Raum die Nachhallzeit und für einzelne Plätze die Verteilung der ersten Rückwürfe nach Pegel, Laufzeit und Einfallrichtung; oder man benutzt eine verkleinerte Nachbildung des geplanten Raumes zu Modellversuchen. Man beobachtet dann die Ausbreitung von Licht oder kurzen Schallwellen im Modellraum. Das Schallgeschehen im akustischen Modell läßt sich mit Hilfe besonderer Vorrichtungen im Kopfhörernachbau verfolgen. Dabei geht jedoch ein großer Teil des räumlichen Eindrucks verloren. Das Ergebnis der optischen Modellversuche oder der Rechnungen versucht man an Hand von Erfahrungen zu deuten, die mit der — meist elektroakustischen — Nachbildung einfacher Sonderfälle gemacht worden sind.

Um nun die Möglichkeiten für eine elektroakustische Nachbildung vollständiger Rückwurf Folgen zu prüfen, werden die bekannten Untersuchungen über die Wirkungen einer Einzelreflexion auch auf die Wahrnehmbarkeit eines oder mehrerer Rückwürfe von Sprachschall ausgedehnt. Es ergibt sich eine Antwort auf die Frage, welche Rückwürfe einer ganzen Rückwurf Folge mit Sicherheit zum Klang- oder Raumeindruck nicht beitragen und daher nicht nachgebildet zu werden brauchen. An Hand der Ergebnisse wird die Frage diskutiert, ob eine elektroakustische Nachbildung gemessener oder errechneter Rückwurf Folgen bei der vielleicht sehr großen Zahl nachzubildender Rückwürfe durchführbar ist.

## 2. Ausgangspunkt und Ziel der Arbeit

### 2.1. Die Deutung von Echogrammen

Seit den ersten Echogrammaufnahmen durch ZENNEK versucht man, aus solchen Aufnahmen auf die Hörsamkeit eines Raumes zu schließen. In vielen Untersuchungen hat man einzelne Rückwürfe durch verzögerte Wiederholung des primären Schallsignals nachgebildet und den so erzielten akustischen Eindruck studiert. So sind die Wirkungen eines Einfachechos von Sprachschall auf die Hörsamkeit und die sich daraus ergebenden Möglichkeiten für die Raumakustik von E. MEYER und seinen Schülern in Göttingen untersucht worden [1], [2]. Dabei hat man sich darauf beschränkt, festzustellen, oberhalb welcher Grenzen in Pegel und Verzögerung ein einzelner Rückwurf bemerkbar wird, respektive den Charakter eines Echos annimmt. Diese Versuche sind verschiedentlich wiederholt und im wesentlichen bestätigt worden [3]. Abweichungen las-

sen sich aus dem Unterschied der für die Feststellung der Bemerkbarkeit verwandten Kriterien erklären. Von verschiedenen weiteren Arbeiten über die Wirkungen eines ersten Rückwurfs sei noch die von MUNCEY und NICKSON genannt, in welcher der Einfluß des Raumnachhalls und der Art der Darbietung untersucht wird [4]. Aus diesen Arbeiten ergeben sich Anhaltspunkte für die Deutung von Echogrammen.

Man hat verschiedentlich versucht, Regeln dafür aufzustellen, wie ein gemessenes oder vorausgerechnetes Echogramm zu lesen beziehungsweise zu deuten sei. Als Beispiele mögen der Vorschlag von BOLT und DOAK zur Voraussage einer Echostörung [5] und das Verfahren von NIESE zur Vorausberechnung eines Echogrades und der damit verbundenen Minderung der Sprachverständlichkeit [6] genannt sein.

Bei solchen Deutungsverfahren wird immer wieder angenommen, daß die Wirkung eines Rückwurfs durch seinen Pegel und seine Verzögerung bestimmt sei, aber nicht merklich von der sonstigen Rückwurfverteilung abhängt. Außerdem wird der Einfluß von Unterschieden der Einfallrichtung als vernachlässigbar klein angesehen.

### 2.2. Das akustische Modellverfahren

Bei diesem Verfahren zur Vorausbestimmung der akustischen Eigenschaften eines geplanten Raumes wird das Schallgeschehen in einem maßstäblich verkleinerten Modell untersucht. Dabei verwendet man den geringeren Abmessungen des Modells entsprechende, kürzere Schallwellen. Auf diese Weise haben SPANDÖCK, CREMER und REICHARDT mit ihren Schülern die Verteilung von Rückwürfen nach Pegel, Laufzeit und Einfallrichtung untersucht und in Form von Echogrammen (Impulsbildern) dargestellt [7]. SPANDÖCK und seine Schüler erweiterten dieses Verfahren mit dem Ziel, das Schallgeschehen im Modell auch hörend beurteilen zu können [8], [9]. Als wesentliches Hilfsmittel benutzen sie ein Magnetophon mit zwei Bandgeschwindigkeiten, die sich um den Verkleinerungsfaktor des Modells unterscheiden. Mit geringer Bandgeschwindigkeit aufgenommene Sprache oder Musik wird mit hoher Bandgeschwindigkeit im Modell wiedergegeben und so in den Bereich der Modellfrequenzen transponiert. In gleicher Weise kann man das Schallgeschehen im Modell stereophon aufnehmen und wieder in den Hörbereich zurücktransponieren, um es dann im Kopfhörernachbau zu verfolgen.

Dieses Verfahren hat seine Grenze darin, daß man das Schallgeschehen im Modell nicht unmittelbar mit den Ohren verfolgen kann. Denn der Mensch kann weder die Integrationszeiten seines Gehörs dem veränderten Zeitmaßstab eines Modells anpas-

sen noch die entsprechend hohen Frequenzen hören. Für alle brauchbaren Verkleinerungsmaßstäbe ist man also darauf angewiesen, Aufnahmen zu speichern und mit Zeitdehnung wiederzugeben. Die damit bisher stets verbundene Verwendung feststehender Mikrophone an Stelle der nach Willkür des Hörers mit dem Kopf beweglichen Ohren bedingt einen Verlust an Richtungsinformation, der zu Fehlbeurteilungen Anlaß geben kann und das Entstehen eines Raumeindrucks behindert. POLLACK und PICKETT haben gezeigt [10], daß die bei stereophoner Übertragung zusätzlich gebotene Richtungsinformation ausreicht, um bis zu 12 dB stärkere Nebengeräusche zu überhören, als das bei einkanaliger Übertragung möglich ist. Ähnliche Unterschiede sind in extremen Fällen auch zwischen stereophoner Kopfhörerwiedergabe und dem direkten Hören zu erwarten, und zwar dann, wenn Nutzschall und Störgeräusch aus zwei Richtungen kommen, deren Unterschied durch ein Paar feststehender Mikrophone nicht eindeutig übermittelt wird.

Das akustische Modellverfahren bietet einen wesentlichen Vorteil dadurch, daß man sehr viele Plätze eines Raumes genau untersuchen kann, ohne daß der Arbeitsaufwand vergleichbar mit der Zahl der untersuchten Plätze steigt. Weitere Vorteile liegen darin, daß man bei Modellversuchen schwerlich einen wichtigen Rückwurf übersehen wird und daß man auch Beugungserscheinungen miterfassen kann, wenn es nur gelingt, Form und Eigenschaften der verwendeten Baumaterialien im Modell genau genug nachzubilden. Das ist jedoch oft schwierig [11]. Mit dem akustischen Modellverfahren läßt sich die Frage, ob störende Echoerscheinungen auftreten werden, mit guter Näherung untersuchen. Wegen des erwähnten Verlustes an Richtungsinformation sind die Ergebnisse dieser Methode wohl als Näherungen anzusehen, welche jedoch Überraschungen nicht ausschließen.

### 2.3. Das Ziel der Arbeit

Als Fortsetzung der genannten Untersuchungen über die Wirkung eines einzelnen Rückwurfs soll in der vorliegenden Arbeit die Wirkung mehrerer Rückwürfe auf die Hörsamkeit mit Sprachschall untersucht werden. Dabei ergibt sich auch eine Prüfung der oben genannten Annahmen.

Zugleich sollen die Möglichkeiten geprüft werden, ein gemessenes oder errechnetes Echogramm dadurch wieder in einen akustischen Eindruck zu verwandeln, daß man in einem reflexionsfreien Raum die einzelnen Rückwürfe elektroakustisch nachbildet. Dabei kann die Einfallsrichtung der einzelnen Rückwürfe berücksichtigt werden, so daß eine solche Nachbildung wieder die vollständige Richtungsinfor-

mation enthält und man einen natürlichen Raumeindruck erwarten sollte, wie ihn selbst das Modellverfahren nicht bietet.

Einen ähnlichen Versuch haben schon früher MEYER und SCHODDER unternommen [12]. Sie versuchten, einen Raumeindruck durch Nachbildung der ersten Reflexionen darzustellen und fanden, daß man auf die Nachbildung des Nachhalls nicht verzichten kann.

Versucht man, diesen Gedanken einer Nachbildung von Rückwurffolgen zu einem elektroakustischen „Modell“-Verfahren zu erweitern, so hängt die Durchführbarkeit des Planes davon ab, wie viele der zahlreichen Rückwürfe, welche ein Echogramm zeigt, zum akustischen Eindruck beitragen. Es ist zu klären, innerhalb welcher Grenzen man mehrere Rückwürfe zusammenfassen kann, ohne den akustischen Eindruck zu verändern, und ob diese Grenzen weit genug sind, um mit erreichbarbarem technischem Aufwand eine ausreichende Nachbildung zu erzielen. Eine solche Grenze ist durch Verdeckungserscheinungen gegeben, wie sie teils als Hörschwellenerhöhung nach einem Reiz, teils als Mithörschwelle beschrieben worden sind. Eine zweite solche Grenze deutet sich in einer Arbeit von HIRSCH an [13], in der festgestellt wird, daß zwei Schallereignisse erst dann als zwei einzelne empfunden werden, wenn das eine gegenüber dem anderen um mehr als 2 ms verzögert ist.

Verdeckungserscheinungen sind inzwischen vielfach untersucht worden, jedoch stets mit Versuchsanordnungen, die eine Übertragung der dort gefundenen Ergebnisse auf das hier interessierende Problem unmöglich machen [14], [15], [16]. Darum wird in dieser Arbeit speziell die Schwelle der Wahrnehmbarkeit eines Rückwurfs — also einer Wiederholung des primären Signals —, und zwar für Sprachschall, untersucht. Es wird weiterhin geprüft, wie sich diese Schwelle verändert, wenn einer oder mehrere Rückwürfe hinzukommen.

## 3. Definitionen und Benennungen

### 3.1. Definition der untersuchten Schwelle

Allgemein ist die Schwelle für einen Reiz definiert als der Betrag, den dieser Reiz überschreiten muß, um bemerkbar zu werden. Als Reize treten in dieser Arbeit elektroakustische Nachbildungen von Rückwürfen auf, das heißt verzögerte Wiederholungen des primären Schallsignals. Die Bestimmung „bemerkenbar“ in der allgemeinen Definition kann durch zusätzliche Forderungen verändert werden, wo es das Ziel der Untersuchung verlangt. Das ist in der vorliegenden Arbeit nicht der Fall. Mit der Bestim-

mung „bemerktbar — ohne Rücksicht darauf, wodurch bemerkbar“ — wird die äußerste Schwelle der Wahrnehmbarkeit bestimmt, jene Grenze in Pegel und Verzögerung, unterhalb deren sich ein zusätzlicher Rückwurf — selbst im Sukzessivvergleich — durch keinerlei bemerkbare Wirkung mehr verrät. Diese Schwelle wird als „absolute Wahrnehmbarkeitsschwelle“ bezeichnet und mit dem Zeichen  $aWs$  abgekürzt. Rückwürfe, die unter der  $aWs$  bleiben, brauchen bei einer Nachbildung mit Sicherheit nicht berücksichtigt zu werden.

Hierbei ist zu bemerken, daß die so definierte  $aWs$  nicht genau jene Schwelle darstellt, an Hand derer man entscheiden kann, ob ein Rückwurf nachgebildet werden muß, oder nicht. Darüber entscheidet der Beitrag des Rückwurfs zum Klang- oder Richtungseindruck, aber nicht notwendig seine Wahrnehmbarkeit im Sukzessivvergleich. Die Schwelle für einen Beitrag zum Raumeindruck ist die für den Plan einer Nachbildung eigentlich interessierende Schwelle. Man kann sie jedoch meßtechnisch so schlecht fassen, daß die  $aWs$  vorerst ihre Stelle vertreten möge. Die Berechtigung dieser Stellvertretung kann jedoch erst in der Schlußdiskussion dieser Arbeit gezeigt werden. Vorerst ist evident, daß die interessierende Schwelle für einen Beitrag zum Raumeindruck nicht unter der  $aWs$  liegen, wohl aber mit dieser zusammenfallen kann.

### 3.2. Definition der Verzögerung

Die Verzögerung eines Rückwurfs gegenüber dem direkten Schall wird definiert als jene Zeit, die zwischen dem Eintreffen der ersten Wellenfront des direkten Schalles und der ersten Wellenfront des Rückwurfs beim Hörer verstreicht.

### 3.3. Bezeichnung der Rückwürfe

Bei der Beschreibung der Versuche wird das unverzögerte Schallsignal mit  $S_0$  bezeichnet. Die verschieden verzögerten Wiederholungen werden ebenfalls mit dem Buchstaben  $S$  bezeichnet und durch Indizes unterschieden. Wo es nötig ist, die verschiedenen Rückwürfe nach ihrer Reihenfolge zu unterscheiden, ohne daß man sich auf bestimmte Verzögerungen festlegt, werden römische Ziffern als Indizes verwandt. Sie zeigen an, um den wievielten Rückwurf es sich handelt. Wo es dagegen nötig wird, die Verzögerung der Rückwürfe genau anzugeben, wird in arabischen Ziffern die in ms gemessene Verzögerung als Index geschrieben. Der Ausdruck  $S_{II} = S_{34}$  bedeutet also, daß der zweite Rückwurf eine Verzögerung von 34 ms hat.

Der zusätzliche Rückwurf, von dem in der Definition der  $aWs$  die Rede war, wird als Testschall mit dem Zeichen  $S_T$  benannt.

## 4. Die Meßmethoden

Für Schwellenmessungen der hier erforderlichen Art kommen in erster Linie die Konstanzmethode (method of constant stimuli, deutsch auch oft Abfragemethode genannt) und das Herstellungsverfahren (method of adjustment) in Betracht.

### 4.1. Die Konstanzmethode

Bei diesem Meßverfahren werden abwechselnd ein Bezugsreiz und ein Vergleichsreiz dargeboten. In dieser Arbeit besteht der Bezugsreiz aus  $S_0$  und gegebenenfalls  $S_I$ ,  $S_{II}$  usw. Beim Vergleichsreiz kommt außerdem noch der Testrückwurf  $S_T$  hinzu. Der Beobachter hat zu entscheiden, in welcher Darbietung er den  $S_T$  vermutet. Die Antwort „unentschieden“ ist dabei nicht gestattet. Wählt man für  $S_T$  einmal einen sehr hohen Pegel, so wird der Beobachter keinen Zweifel haben und jedesmal richtig entscheiden: 100% seiner Antworten werden richtig sein. Wiederholt man den Versuch mit einem sehr geringen Pegel von  $S_T$ , so wird der Beobachter die beiden Darbietungen nicht unterscheiden können und raten müssen: nur 50% seiner Antworten werden richtig ausfallen. Führt man diesen Teilversuch nun mit einer Reihe verschiedener Pegel von  $S_T$  durch und trägt die Häufigkeit richtiger Antworten als Funktion des Pegels auf, so erhält man eine Kurve für die Wahrscheinlichkeit einer richtigen Antwort als Funktion des Pegels. Jener Pegel von  $S_T$ , bei dem diese Wahrscheinlichkeitsfunktion den Wert von 75% erreicht, gilt als der Schwellenwert, welcher dann als Meßpunkt erscheint. Führt man das Verfahren für verschiedene Verzögerungen von  $S_T$  durch, so erhält man den gesuchten Verlauf der  $aWs$  als Funktion der Verzögerung von  $S_T$ .

### 4.2. Das Beurteilungsverfahren

Außer der genauen, aber auch langwierigen Konstanzmethode ist in der vorliegenden Arbeit häufig eine Variante des Herstellungsverfahrens verwendet worden.

Beim Herstellungsverfahren wird von dem Beobachter verlangt, daß er mit Hilfe eines Reglers die jeweils interessierende Größe solange verändert, bis er meint, er habe den jeweils geforderten Zustand hergestellt. In unserem Fall bedeutet dies, daß der Beobachter den Pegel von  $S_T$  so lange variiert, bis er meint,  $S_T$  sei eben an der Grenze der Wahrnehmbarkeit. Hierbei unterliegt der Beobachter sehr leicht Selbsttäuschungen. Er kann das jedoch weitgehend vermeiden, wenn er die Möglichkeit erhält,  $S_T$  ganz abzuschalten. Das um diese Möglichkeit erweiterte Herstellungsverfahren wurde Beurteilungsverfahren genannt und besonders dann verwendet, wenn es weniger auf den absoluten Schwellenwert als auf den Unterschied zweier Schwellen ankam.

## 5. Die Versuchsanordnung

### 5.1. Der Versuchsaufbau

Die Messungen sind im reflexionsfreien Raum ausgeführt worden. Da die Arbeit keine systematische Untersuchung der Winkelabhängigkeiten zum Ziel hat, beschränkt sie sich auf einzelne feste Richtungen. Auf Grund einer Arbeit von BURGTORF [17] können dabei  $30^\circ$  als hinreichender Winkelunterschied gelten, um die besonderen Effekte der Richtungsnachbarschaft auszuschließen. Daher werden die Untersuchungen stets nur für gleiche und für hinreichend verschiedene Einfallsrichtungen durchgeführt.

Die verschiedenen Lautsprecher hatten alle einen Abstand von 4 m vom Kopf der Versuchsperson. Der Beobachter darf den Kopf frei bewegen. Die Pegel wurden mit Hilfe eines hochwertigsten Kondensatormikrophons am Hörerort kontrolliert. Die Geräte standen im Vorraum und konnten von einem Pult aus bedient werden. Eine Beschreibung der apparativen Anlage findet sich in der Arbeit von BURGTORF und SERAPHIM in diesem Heft (S. 92).

### 5.2. Das Motiv

Die Versuche sind sämtlich mit fortlaufendem Text durchgeführt worden. Dazu war ein Zeitungsartikel von etwa 20 Minuten Lesedauer im reflexionsfreien Raum gesprochen und nachhallfrei auf Tonband aufgenommen worden. Der Sprecher bemühte sich um gleichbleibende Lautstärke und sprach etwa fünf Silben pro Sekunde. Ein kleinerer Teil der Experimente ist mit einer stetig wiederholten Wortfolge („Zack — der Minimax“) durchgeführt worden. Die Ergebnisse aus diesem Teil der Versuche stimmten mit den übrigen überein.

In diesem Zusammenhang ist auf eine Besonderheit der hier vorgelegten Untersuchungen hinzuweisen. In ähnlichen Arbeiten verwendeten die Autoren [14], [15], [16] als Schallsignale Impulse und richteten ihre Anordnungen so ein, daß der die Verdeckung bewirkende Primärimpuls schon beendet war, ehe der verdeckte Testimpuls begann. Verdeckender und verdeckter Schall erklangen also nie gleichzeitig. In der vorliegenden Arbeit wird dagegen eine Art Dauerschall verwendet, nämlich Sprachschall. Während  $S_T$  ertönt, ist  $S_0$  also weiterhin zu hören. Weil die in Frage kommenden Verzögerungen des  $S_T$  gegenüber  $S_0$  klein sind im Vergleich zur Dauer eines Wortes, findet die Verdeckung hier fast nur durch einen gleichzeitig erklingenden Schall statt. Dabei unterscheiden sich die momentanen Spektren des verdeckenden und des verdeckten Schalles um so mehr, resp. um so öfter, je größer die Verzögerung des  $S_T$  gewählt wird. Handelte es sich bei den Messungen an Impulsen um

Nacherregungserscheinungen, so handelt es sich in dieser Untersuchung um Mithörphänomene; jene Schwellen könnte man Nacherregungsschwellen nennen, diese Mithörschwellen. Die Ergebnisse der oben genannten Autoren lassen sich demnach nicht ohne weiteres zur Beantwortung der hier vorliegenden Frage heranziehen.

### 5.3. Die Versuchspersonen

STEINBERG und MUNSON haben festgestellt, daß bei ihren Lautstärkeuntersuchungen das mit 100 ungeübten Beobachtern gemessene Ergebnis nicht merklich von dem einer kleinen Gruppe geübter Beobachter verschieden war [18]. Dies entspricht auch einer Erfahrung des Verfassers, der bei einer früheren Untersuchung [19] vom Durchschnitt sehr vieler ungeübter Beobachter fast das gleiche Ergebnis erhielt, wie im Selbstversuch. Voraussetzung dafür ist jedoch, daß der geübte Beobachter auch bei langer Übung weder aus den Schalterstellungen noch aus dem Rhythmus, weder aus Grundrauschen oder Knacken noch auf irgend eine andere Weise unerwünschte Information erhalten kann. Auf Grund dieser Erfahrungen wurde die Apparatur so ausgelegt, daß die Experimente als Selbstversuch des Verfassers durchgeführt werden konnten. Entsprechende Sicherungsmaßnahmen sind schon in einer früheren Arbeit des Verfassers beschrieben worden [20].

Außerdem wurden gelegentliche Kontrollversuche mit unvoreingenommenen Beobachtern unternommen. Die Ergebnisse solcher Versuche lagen stets innerhalb der Fehlergrenzen der damit kontrollierten Messungen.

Genau genommen beschreiben die im folgenden vorgelegten Ergebnisse also nur die Hörfähigkeit des Verfassers. Auf Grund der angeführten Erfahrungen und der Kontrollversuche können die Ergebnisse jedoch als brauchbare Näherung für die Hörfähigkeit eines breiten Durchschnittes gelten.

## 6. Ergebnisse

### 6.1. Rückwurfverdeckung durch einen Primärschall

#### 6.1.1. Verdeckung für ungleiche Richtungen

In diesem Versuch wird die Schwelle der Wahrnehmbarkeit eines ersten Rückwurfs bestimmt, der aus einer anderen Richtung zu hören ist als der Pri-

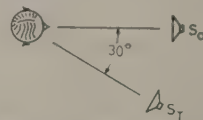


Bild 1. Lautsprecheranordnung für die Messung der aWs bei ungleichen Richtungen.

märtschall. Die Anordnung der Lautsprecher ist in Bild 1 gezeigt.

Die Schwelle ist mit beiden eingangs beschriebenen Verfahren bestimmt worden. Die Darstellung der Ergebnisse in Bild 2 zeigt den relativ konstanten und kleinen Unterschied. Das Beurteilungsverfahren täuscht jedoch immer eine etwas zu große Verdeckung vor. Die Schwelle beginnt, als läge der Schwellenwert ohne Verzögerung bei  $-15$  dB. Für Verzögerungen unter  $2$  ms kann man diesen Messungen jedoch keine Aussage entnehmen. Scheinbar bei  $-15$  dB beginnend, zeigt die aWs hier einen monotonen Abfall bis zur Hörschwelle, die durch das apparativ gegebene Grundrauschen erhöht ist. Bei linearem Maßstab von Verzögerung und Pegel erscheint die Schwellenkurve als Gerade, die sich mit  $0,5$  dB/ms der Hörschwelle nähert und schließlich in diese einmündet. Die genaue Form des Einmündens der aWs in die Hörschwelle interessiert in der vorliegenden Arbeit nicht. Die Meßpunkte geben wegen des Wanderns der nicht durch künstliches Rauschen festgelegten Hörschwelle in deren Nähe ein verwaschenes Bild. Die Darstellung hält sich an das Ergebnis von Einzeluntersuchungen.

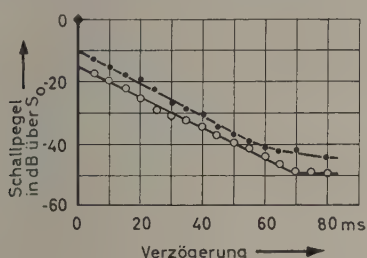


Bild 2. Die aWs eines ersten, mit dem Primärschall nicht richtungsgleichen Rückwurfes; gemessen mit verschiedenen Verfahren. Der Primärschallpegel betrug  $70$  dB über  $2 \cdot 10^{-4}$  dyn/cm $^2$ .

●—● Beurteilungsverfahren,  
○—○ Konstanzmethode.

Versucht man, diesen gemessenen Verlauf der aWs von Sprachschall mit den Resultaten zu vergleichen, die sich bei STEIN, RUBIN und anderen finden [14], [15], [16], so fällt zuerst auf, daß die aWs hier im linearen Maßstab der Verzögerung zur Geraden wird, nicht im logarithmischen. Der Verfasser vermutet, daß dieser und andere Unterschiede zum Teil auf die Verschiedenheit von Nacherregungsschwellen und Mithörschwellen zurückgehen. Zum Teil werden sie auch darin ihren Grund haben, daß die von den genannten Autoren verwandten Impulse außerordentlich kurz waren. Ob sich die hier zu  $0,5$  dB/ms gemessene Neigung der Schwellenkurve verändert, wenn der Pegel des Primärschalls variiert wird, ist nicht untersucht worden. Trotz merklicher Unterschiede in der Versuchsanordnung können

hierzu die Ergebnisse von BURGTORF einen Anhalt bieten [17].

Die gezeigten Meßwerte sind Mittelwerte aus verschiedenen, zum Teil mehrere Monate auseinanderliegenden Messungen, deren Ergebnisse untereinander gut übereinstimmen. Zusammengekommen ist jeder Beurteilungsversuch mindestens  $10$ -mal durchgeführt worden, jeder der mindestens  $6$  zu einem Meßpunkt der Konstanzmethode führenden Teilversuche mindestens  $16$ -mal. Die Fehlergrenze  $\sigma$  beträgt bei dieser Messung  $\pm 1,5$  dB.

## 6.1.2. Verdeckung für gleiche Richtungen

Diese Versuchsreihe unterscheidet sich von der eben beschriebenen lediglich dadurch, daß Primärschall  $S_0$  und Testrückwurf  $S_T$  aus der gleichen Richtung zu hören sind. Ein weiterer Unterschied in Versuchsaufbau und Durchführung bestand nicht. Zu bemerken ist jedoch, daß für jedes der beiden Schallsignale ein eigener Lautsprecher verwandt wurde. Die Lautsprecher standen aufeinander. Strenge Richtungsgleichheit ist also nicht verwirklicht. Der Richtungsunterschied betrug  $5^\circ$  in der Vertikalen. Diese Anordnung entspricht der von BURGTORF bei der Messung von Winkelabhängigkeiten für den Fall der Richtungsgleichheit verwendeten, so daß die in Bild 3 dargestellten Ergebnisse dieser Versuche mit denen von BURGTORF direkt verglichen werden können.

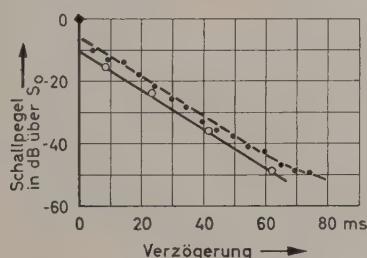


Bild 3. Die aWs eines ersten, mit dem Primärschall richtungsgleichen Rückwurfes; gemessen mit zwei verschiedenen Verfahren. Der Primärschallpegel betrug  $70$  dB über  $2 \cdot 10^{-4}$  dyn/cm $^2$ .

●—● Beurteilungsverfahren,  
○—○ Konstanzmethode.

Die veränderte Aufstellung bewirkt nicht nur eine Verschiebung des scheinbaren Schwellenanfanges zu etwa  $5$  dB höheren Pegelwerten hin, sondern auch eine größere Neigung der Schwellenkurve, die sich der Hörschwelle im hier untersuchten Fall mit  $0,6$  dB/ms nähert. Die Meßpunkte aus der Konstanzmethode stammen aus zwei Untersuchungen, die einen Monat auseinander liegen, und sind für jeden der etwa  $6$  zu einem gezeigten Meßpunkt führenden Teilversuche durch  $25$  Antworten belegt. Für

diese Kurve ist die Fehlergrenze  $\sigma$  gleich  $\pm 1,5$  dB. Die Messungen mit dem Beurteilungsverfahren sind je zweimal durchgeführt worden.

## 6.2. Die Verdeckung durch Primärschall und ersten Rückwurf

### 6.2.1. Die möglichen Richtungsbeziehungen

Hier ist eine Voruntersuchung über die Möglichkeiten geboten, die man bei der Wahl der Einfallrichtungen für die beteiligten Schallsignale hat. Beschränkt man sich — wie das allgemein in der vorliegenden Arbeit geschieht — auf azimutale Richtungen, dann behält man nach Fortlassen je einer von zwei spiegelsymmetrischen Kombinationen noch sieben mögliche Aufstellungsweisen. Diese lassen sich übersichtlich schreiben, wenn man in der Bezeichnungsweise für die Rückwürfe das S (für den Schall) durch ein  $\beta$  (für die Einfallrichtung des Rückwurfes) ersetzt. Dann zeigt der Index von  $\beta$  an, welcher Rückwurf aus der Richtung  $\beta$  kommt. Die Richtungen mögen von vorne ( $= 0^\circ$ ) anfangend mit dem Uhrzeiger gezählt werden. Ungleichheit zweier Richtungen bedeutet dabei wieder einen Unterschied von mindestens  $30^\circ$ . Damit schreiben sich die sieben möglichen Richtungskombinationen:

- |                                        |                                     |
|----------------------------------------|-------------------------------------|
| (a) $\beta_0 = \beta_I = \beta_T$ ,    | (e) $\beta_0 < \beta_T < \beta_I$ , |
| (b) $\beta_0 \neq \beta_I = \beta_T$ , | (f) $\beta_0 < \beta_I < \beta_T$ , |
| (c) $\beta_0 = \beta_I \neq \beta_T$ , | (g) $\beta_I < \beta_0 < \beta_T$ , |
| (d) $\beta_0 = \beta_T \neq \beta_I$ , |                                     |

In einem orientierenden Vorversuch ist die aWs für jede dieser 7 Richtungskombinationen untersucht worden. Für  $S_I$  wurde eine Verzögerung von 40 ms gewählt; die Pegel von  $S_0$  und  $S_I$  ( $= S_{40}$ ) waren gleich. Die Ergebnisse einmaligen Beurteilens sind in Bild 4 dargestellt. Sie beanspruchen keine besondere Genauigkeit.

Wie zu erwarten, war die Verdeckung am größten, wenn aller Schall aus einer Richtung kam, also für die Möglichkeit (a). Die Verdeckung ist am kleinsten bei den Richtungskombinationen (f) und (g), bei welchen alle Richtungen ungleich sind und der verdeckte  $S_T$  nicht zwischen  $S_0$  und  $S_I$  liegt. Man erkennt weiterhin, daß zwei typische Schwellenformen vorherrschen.

Im folgenden werden nur noch die extremen Fälle untersucht, nämlich die Schwellen für allgemeine Richtungsgleichheit und für allgemeine Richtungsungleichheit. Diese Vereinfachung erlaubt es, die Untersuchung später auch auf die Wirkung von zwei und mehr Rückwürfen auszudehnen, ohne gleich sehr viele Schwellen zu untersuchen. Denn man wird annehmen können, daß auch bei mehreren Rück-

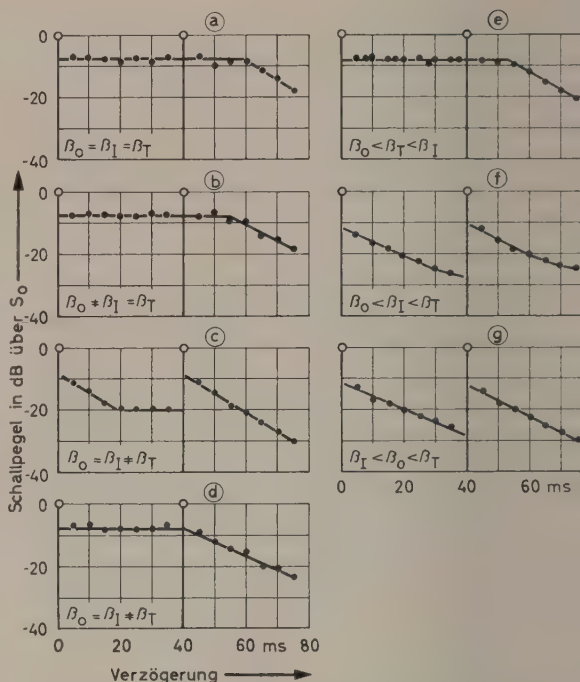


Bild 4. Ergebnisse aus einem Vorversuch über den Schwellenverlauf bei verschiedenen Richtungskombinationen. Erklärung der Bezeichnungen im Text.

würfen Richtungsgleichheit die höchste und Richtungsungleichheit die geringste Verdeckung bewirken werden.

### 6.2.2. Verdeckung für ungleiche Richtungen

In dieser Versuchsreihe wird die Schwelle der Wahrnehmbarkeit eines zweiten Rückwurfes bestimmt, und zwar für den Fall, daß Primärschall, erster (fester) Rückwurf und zweiter (Test-) Rückwurf aus drei verschiedenen Richtungen zu hören sind. Die Aufstellung der Lautsprecher ist in Bild 5 gezeigt.

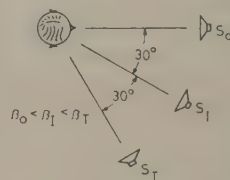


Bild 5. Lautsprecheranordnung für die Messung der aWs eines zweiten Rückwurfes bei ungleichen Richtungen.

In dieser Versuchsreihe ist der Einfluß zweier Parameter zu prüfen, nämlich des relativen Pegels und der Verzögerung von  $S_I$ . Das Ergebnis ist in vier Beispielen auf Bild 6 dargestellt. Es ist deutlich,

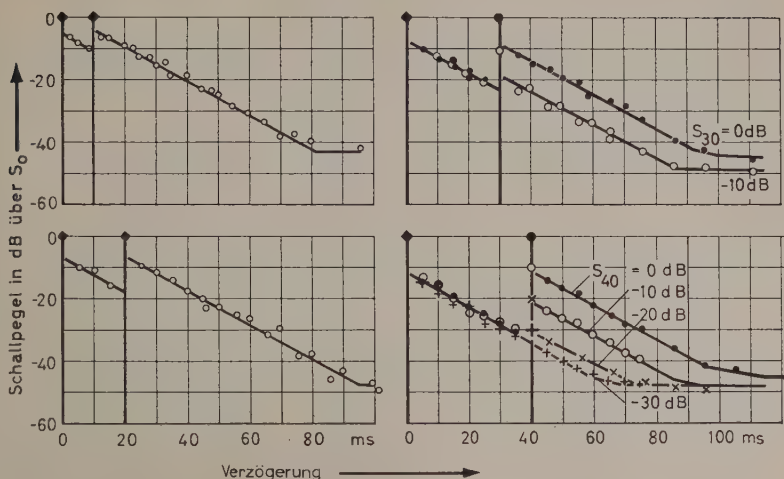


Bild 6. Die aWs eines zweiten Rückwurfs in Abhängigkeit von dessen Verzögerung und Pegel für allgemeine Richtungsungleichheit. Der Primärschallpegel betrug 70 dB über  $2 \cdot 10^{-4}$  dyn/cm<sup>2</sup>.

daß sich — etwa gegenüber Bild 2 — qualitativ nichts geändert hat. Jeder pegelgleiche Rückwurf hat unter den gegebenen Umständen die gleiche verdeckende Wirkung wie der Primärschall, und der Verlauf der Schwellenkurve wiederholt sich nach  $S_I$  in der gleichen Weise wie nach  $S_0$ .

Bleibt die Form des Schwellenverlaufs auch erhalten, so sieht man doch, daß die Verzögerung von  $S_I$  einen Einfluß auf die Größe der Verdeckung hat. Für kleine Verzögerungen des  $S_I$  ist die Verdeckung größer als für große Verzögerungen.

Variation des Pegels von  $S_I$  bringt ebenfalls keine qualitative Neuerung. Ein schwächerer Rückwurf hat auch geringere verdeckende Wirkung, und die Form der Schwellenkurve bleibt unverändert.

Jeder Beurteilungsversuch wurde im Mittel 10-mal durchgeführt. Die Fehlergrenze beträgt hier  $\pm 1,5$  dB. Meßmethode war das Beurteilungsverfahren.

### 6.2.3. Verdeckung für gleiche Richtungen

In dieser Versuchsreihe wird die Schwelle der Wahrnehmbarkeit eines zweiten Rückwurfs bestimmt, und zwar für den Fall, daß erster (fester) Rückwurf und zweiter (Test-) Rückwurf aus der gleichen Richtung zu hören sind wie der Primärschall. Für jedes der drei Schallsignale wurde ein eigener Lautsprecher verwandt; diese standen übereinander. Meßmethode war wieder das Beurteilungsverfahren.

Auch in dieser Versuchsreihe ist sowohl der Einfluß des Pegels als auch der der Verzögerung des  $S_I$  untersucht worden. Die Ergebnisse sind in Bild 7 zusammengestellt.

Hier ist nun eine generelle Veränderung des Schwellentyps zu bemerken, wie sie sich schon im Vorversuch zur Richtungsabhängigkeit gezeigt hatte. Die Schwellen beginnen — wieder für kleine Ver-

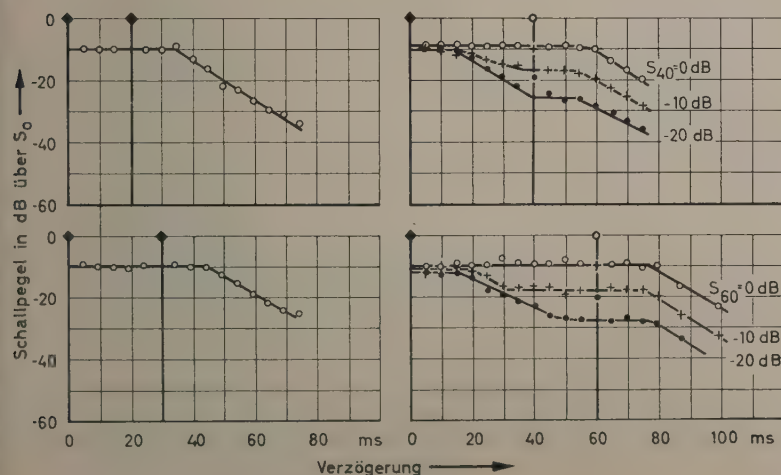


Bild 7. Die aWs eines zweiten Rückwurfs in Abhängigkeit von dessen Verzögerung und Pegel für allgemeine Richtungsungleichheit. Der Primärschallpegel betrug 70 dB über  $2 \cdot 10^{-4}$  dyn/cm<sup>2</sup>.

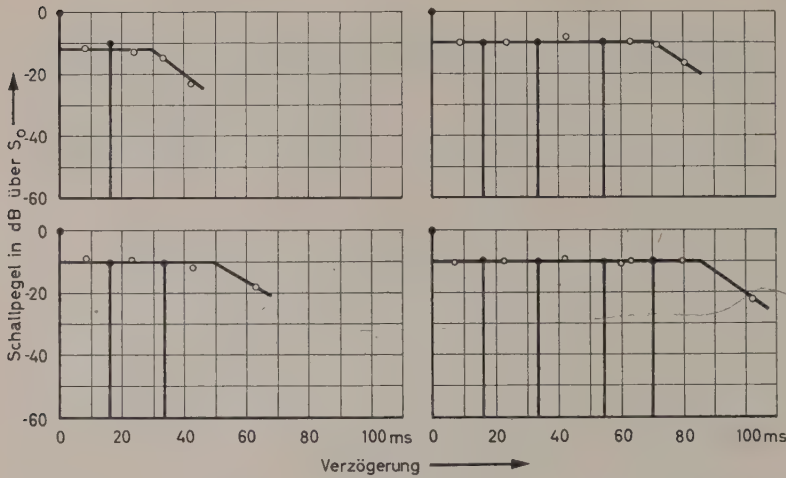


Bild 8. Die aWs eines Rückwurfs bei Verdeckung durch Primärschall und mehrere Rückwürfe gleicher Richtung. Der Primärschallpegel betrug 70 dB über  $2 \cdot 10^{-4}$  dyn/cm<sup>2</sup>.

zögerungen — scheinbar bei -10 dB mit einem waagerechten Teilstück, das gleichbleibende Verdeckung anzeigt und bis zu Verzögerungen von 15 ms gegenüber dem  $S_I$  reicht. Erst danach nähern sie sich der Hörschwelle in schon bekannter Weise mit etwa 0,6 dB/ms. Diese Schwellenform ist bei verschiedenen Verzögerungen des  $S_I$  bis hin zu 100 ms stets von gleicher Art. Bei noch größeren Verzögerungen wird die Messung sehr schwierig, weil  $S_I$  dann schon ein stark störendes Echo darstellt.

Eine weitere Besonderheit zeigt sich bei der Variation des Pegels von  $S_I$ . Anders als bei dem in Bild 3 dargestellten Ergebnis einer Messung ohne  $S_I$  beginnt die dem Primärschall folgende Schwelle hier — ebenso wie die an  $S_I$  anschließende — bei -10 dB mit einem waagerechten Teil. Hier tritt also der Fall ein, daß ein Rückwurf den im Echogramm an  $S_0$  anschließenden Schwellenteil mitbestimmt.

Der typische, gegenüber den bisher gezeigten Kurven veränderte Verlauf der aWs ist in Einzeluntersuchungen mit der Abfragemethode durch mehr als 25 Urteile — für jeden der etwa vier hier zu einem Meßpunkt führenden Teilversuche — hinreichend gesichert und durch einen unvoreingenommenen Beobachter bestätigt worden. Die Fehlergrenze beträgt für die hier gezeigten Kurven  $\sigma = \pm 2$  dB. Die Meßpunkte in Bild 7 sind Mittelwerte aus dreimaligem Beurteilen.

### 6.3. Verdeckung durch Primärschall und weitere Rückwürfe

Nachdem untersucht ist, wie Primärschall und erster Rückwurf einen zweiten Rückwurf verdecken, bleibt noch zu kontrollieren, ob mit der Verdeckung durch mehrere Rückwürfe weitere neue Erscheinungen verbunden sind. Aus einer Untersuchung zu dieser Frage gibt Bild 8 Ergebnisse für den Fall der

Richtungsgleichheit wieder. Gemessen wurde mit der Konstanzmethode. Die Meßpunkte sind durch teils 10, teils 20 Urteile für jeden der hier etwa 6 zu einem Meßpunkt führenden Teilversuche belegt.

Es ist deutlich zu sehen, daß die Schwelle auch hier stets bis zu Verzögerungen von 15 ms mehr als der Verzögerung des letzten Rückwurfs entspricht, konstanten Wert behält und sich dann in bekannter Weise der Hörschwelle zuwendet. Dies Verhalten der Schwelle ist auch für andere (aber untereinander gleiche) Pegel der Rückwürfe beobachtet worden. Dabei erinnert die Steigerung der maximalen Verdeckung mit der Zahl der beteiligten Rückwürfe oft an eine Energieaddition, so daß man einen Zusammenhang dieser Schwelle mit der Lautstärkebildung vermuten kann. Die beobachtete Kurvenform legt ebenfalls einen Zusammenhang mit der von NIESE durch Lautstärkevergleiche gemessenen „Integrationskraft“ des Ohres nahe [6]. Eine entsprechende Beziehung zwischen der aWs und dem Lautstärkeindruck hat auch BURGTORF beobachtet [17].

Versuche mit Verdeckung des  $S_T$  durch mehrere richtungsungleiche Rückwürfe ergaben nichts qualitativ Neues. Hier kann man das Resultat der Ver-

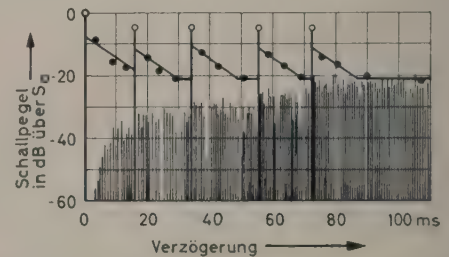


Bild 9. Die aWs eines Rückwurfs bei Verdeckung durch Primärschall, vier Rückwürfe ungleicher Richtung und Nachhall. Der Primärschallpegel betrug 70 dB über  $2 \cdot 10^{-4}$  dyn/cm<sup>2</sup>.

suche mit Verdeckung durch nur einen nicht richtungsgleichen Rückwurf verallgemeinern (cf. auch Bild 9).

#### 6.4. Rückwurfverdeckung durch Nachhall

Um die Auswirkungen künstlichen Nachhalls auf die Wahrnehmbarkeitsschwelle zu studieren, mußte für diesen eine Darbietungsform gefunden werden, welche dem mehr oder minder diffusen Nachhallfeld wirklicher Räume nahekam. Dazu wurde das Signal in einer Nachhallplatte verhallt und an zwei Stellen dieser Platte durch Körperschallmikrophone wieder abgenommen. Eine entsprechende Schaltung stellte zu diesen – weitgehend inkohärenten – Tensionen noch deren Summe und Differenz her. Diese vier Verhallungen des gleichen Signals wurden verstärkt und über vier verschiedene Lautsprecher im Versuchsraum abgestrahlt. Dabei waren die Richtungen der Lautsprecher in ihrem Azimut um je  $90^\circ$  unterschieden. Weil der Nachhall aber im natürlichen Fall fast nur aus dem oberen Teil des Raumes kommt, wurden die Nachhalllautsprecher unter einem Höhenwinkel von etwa  $40^\circ$  aufgehängt. Bei geeigneter Einstellung der Pegel ließ sich erreichen, daß für den Beobachter keine Phantomschallquelle und keine Vorzugsrichtung mehr erkennbar war. Mit dieser Art der Nachhallnachbildung sind dann Versuche angestellt worden. Dabei ergab sich, daß für die verdeckende Wirkung des Nachhalls im untersuchten Bereich bis 100 ms dessen Spitzenpegel bestimmend ist. Sofern die ohne Nachhall gemessene aWs oberhalb dieses Spitzenpegels liegt, wird sie durch den Nachhall nicht verändert; unter die Nachhallenvelope kann sie jedoch nicht sinken.

Vergleicht man Echogramme aus verschiedenen Räumen und von verschiedenen Plätzen miteinander, so kann man feststellen, daß der Nachhall oft nicht mit voller Amplitude einsetzt, sondern daß er sich unter den ersten prägnanten Reflexionen nach und nach aufbaut. Darum ist weiter untersucht worden, ob die Verzögerung des Nachhalleinsatzes oder die Form der Envelope, welche den Nachhallaufbau beschreibt, einen Einfluß auf die verdeckende Wirkung des Nachhalls zeigen. Für die Verzögerung des Nachhalleinsatzes ist dies bis zu Verzögerungen von 100 ms nicht der Fall; darüber hinaus sind die Untersuchungen nicht ausgedehnt worden. Die Einhüllende des Nachhallaufbaus hat nur dann einen Einfluß, wenn sie sehr ausgeprägte Stufen zeigt, welche als Rückwürfe erscheinen können und dann als solche verdeckend wirken.

Um zu prüfen, ob die mit wenigen Reflexionen gemessenen Schwellen auch für „dichte“ Rückwurfolgen (= Nachhall) gelten, wurde abschließend für allgemeine Richtungsungleichheit und für allgemeine

Richtungsungleichheit die aWs eines  $S_T$  untersucht, der von  $S_0$ , vier Rückwürfen und Nachhall verdeckt wurde. In den Bildern 9 und 10 sind die Schwellenkurven gezeichnet, die bei den gezeigten „Echogrammen“ erwartet werden konnten. Bild 9 zeigt den erwarteten Verlauf für ungleiche Richtungen, Bild 10 für gleiche Richtungen der beteiligten Rückwürfe. Man erkennt, daß das Meßergebnis den Erwartungen entspricht. Gemessen wurde mit der Konstanzmethode; die einzelnen Meßpunkte sind durch je 10 Urteile für jeden Teilversuch gesichert.

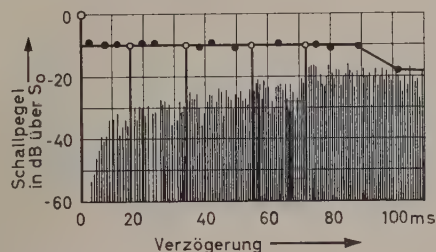


Bild 10. Die aWs eines Rückwurfs bei Verdeckung durch Primärschall, vier richtungsgleiche Rückwürfe und Nachhall. Der Primärschallpegel betrug 70 dB über  $2 \cdot 10^{-4}$  dyn/cm<sup>2</sup>.

#### 7. Diskussion der Ergebnisse

Ein Ziel dieser Arbeit war es, die Kenntnisse zu erweitern, auf die man sich bei der Deutung von Echogrammen stützen konnte. Das ist in zweifacher Weise geschehen. Einmal stellen die gemessenen Schwellen Grenzen dar, unterhalb derer ein Rückwurf nicht bemerkt wird, also auch nicht stören kann. Die von verschiedenen Autoren bestimmte Grenzkurve, unterhalb deren ein Rückwurf nicht mehr als Rückwurf in Erscheinung tritt [2], erlaubte keine Aussage darüber, unterhalb welcher Grenze ein Rückwurf akustisch unwirksam ist. Diese Frage ist durch die oben vorgelegten Untersuchungen weitgehend beantwortet. Es ergibt sich, daß die aWs und die genannte Grenzkurve sich bis zu 30 dB unterscheiden können.

Zum anderen zeigen die vorgelegten Ergebnisse, daß die bisher oft benutzte Annahme, störende und verdeckende Wirkung seien von Pegel und Verzögerung eines Rückwurfes bestimmt, jedenfalls für die aWs nicht allgemein haltbar ist. Sie gilt nur, solange aus einer Richtung nicht mehr als ein vergleichbarer Rückwurf innerhalb von 100 ms eintrifft. In anderen Fällen wird die resultierende Verdeckung durch die richtungsgleichen Rückwürfe in relativ übersichtlicher Weise mitbestimmt. Danach ist auch die zweite Annahme, Richtungsunterschiede hätten keine merkbare Wirkung, mindestens für die aWs nicht zu halten.

Schon 1955 hat SCHODDER die Meinung geäußert, daß die Gesamtheit einer Rückwurffolge die Wirkung eines einzelnen Rückwurfs mitbestimmen könne [21]. Hier findet sich diese Ansicht an einem Beispiel bestätigt.

Ein weiteres Ziel der Arbeit war es festzustellen, welche Rückwürfe einer errechneten oder gemessenen Rückwurffolge in einer Nachbildung zu berücksichtigen wären und welche nicht. Dazu erlauben die Untersuchungen zwei Aussagen.

Erstens ist — wie unter Ziffer 3 schon erwähnt — die aWs nicht genau jene Schwelle, an Hand deren man über die Notwendigkeit einer Nachbildung entscheiden kann, aber die eigentlich interessierende Schwelle kann nie unter der aWs liegen. Denn es ist undenkbar, daß ein Rückwurf den Klangeindruck merklich bestimmt, ohne durch eine Wirkung auf den Klangeindruck bemerkt zu werden. Darum stellt schon die aWs ein Kriterium dar, durch das die Zahl der nachzubildenden Rückwürfe nach oben hin begrenzt ist.

Zweitens ist bei der Durchführung der Versuche aufgefallen, daß man sich bei der Beurteilung schwer unterscheidbarer Darbietungen — also nahe an der Schwelle — nicht immer nach den gleichen Merkmalen richtet. Die Aussagen der gelegentlich hinzugezogenen fremden Versuchspersonen stimmen mit der Beobachtung des Verfassers darin überein, daß die Wirkung, mit welcher sich ein Testrückwurf bemerkbar macht, entweder zum Beispiel ein Beitrag zur Lautstärke oder einer zur Klangfarbe oder einer zum Richtungseindruck ist. Dabei verwenden die Beobachter jeweils das Erkennungsmerkmal, das ihnen die Entscheidung am meisten erleichtert, so daß die Schwelle stets durch das schärfste Kriterium bestimmt wird.

Auf Grund dieser Beobachtungen kann man die aWs beschreiben als jene Schwelle, jenseits deren ein Rückwurf entweder zum Lautstärkeindruck oder irgend einem anderen Eindruck beiträgt. Die eigentlich gesuchte Schwelle, oberhalb deren ein Rückwurf zum Klang- oder Richtungseindruck beiträgt, unterscheidet sich von der aWs nur dadurch, daß ein Rückwurf noch als unschwellig gilt, wenn er lediglich die Lautstärke erhöht. Damit hat man ein Mittel in der Hand, um zu entscheiden, wann die gesuchte Schwelle für einen Beitrag zum Raumeindruck von der aWs abweicht. Das wird immer dort der Fall sein, wo die aWs am leichtesten durch Lautstärkeurteile zu bestimmen ist, was nach den Beobachtungen des Verfassers in sehr vielen Fällen zutrifft. Unverkennbar ist die schwelldeterminierende Rolle der Lautstärkeurteile immer dort, wo die gemessenen Schwellenkurven mit einem waagerechten Teilstück beginnen, weniger deutlich bei den monoton abfallenden Schwellen. Für diese aber läßt sich wahr-

scheinlich machen, daß die Schwelle für einen Beitrag zum Raumeindruck näherungsweise um 6 dB über der mit der Konstanzmethode gemessenen aWs liegt. Auch für andere Schwellenformen scheint sie nicht wesentlich näher an die aWs heranzurücken. Lediglich wenn der  $S_T$  dadurch eine Sonderstellung hat, daß der ihn abstrahlende Lautsprecher nicht zwischen zwei anderen, sondern als äußerster einer Gruppe aufgestellt ist, verrät sich dieser am ehesten durch einen Beitrag zum Raumeindruck, so daß die gesuchte Schwelle mit der aWs identisch wird.

Die aWs ist also nicht nur eine Grenze für die Wahrnehmbarkeit eines Rückwurfs im Sukzessivvergleich. Da sich die Unterschiede zwischen den beiden Schwellen abschätzen lassen, stellt sie darüber hinaus eine brauchbare Annäherung an die Schwelle für einen Beitrag zum Raumeindruck dar und konnte diese in einer ersten Untersuchung vertreten.

Weil sich die gemessenen Schwellen oberhalb der Enveloppe eines hinzukommenden Nachhalls nicht ändern (cf. Bild 9 und 10), darf man annehmen, daß sie sich auch auf Echogramme anwenden lassen.

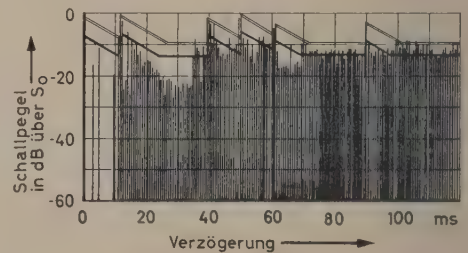


Bild 11. Die Schwelle der Wahrnehmbarkeit (aWs) und die vermutete Schwelle für einen Beitrag zum Raumeindruck, konstruiert für ein gemessenes Echogramm.

— absolute Schwelle der Wahrnehmbarkeit,  
— Schwelle für einen Beitrag zum Raumeindruck.

In Bild 11 ist als Beispiel für eine solche Anwendung die aWs für das dort gezeigte Echogramm konstruiert worden. Dazu mußte jedoch noch eine Annahme darüber gemacht werden, von welcher Grenze an die Rückwurffolge als Nachhall gelten kann. An Hand von Beobachtungen über die Größe des Winkelgebietes, innerhalb dessen man zwei nicht genau richtungsgleiche Rückwürfe noch als richtungsgleich ansehen kann (Richtungsgruppe), läßt sich diese Grenze abschätzen. Mit Hilfe dieser Abschätzung wurde die aWs in Bild 11 konstruiert. Dabei ist weiterhin angenommen worden, daß alle prägnanten Rückwürfe aus verschiedenen Richtungen kommen. Die Rückwurffolge ist nach einem amplitudenlinear geschriebenen Echogramm umgezeichnet. Die zeitliche Dichte der Rückwürfe ist zeich-

nerisch schon nicht mehr darstellbar und daher schematisiert.

An Hand der oben genannten Vermutung über den Unterschied zwischen der aWs und der Schwelle für einen Beitrag zum Raumeindruck kann man nun auch versuchen festzustellen, in welcher Größenordnung die Zahl der Rückwürfe liegt, die am Raumeindruck mitwirken. Dazu ist in Bild 11 außer der stark ausgezogenen aWs mit einem feinen Doppelstrich auch der vermutete Verlauf der Schwelle eines Beitrages zum Raumeindruck eingezeichnet. Es ergibt sich, daß man für den gezeichneten Teil des Echogramms mit etwa 12, für das ganze Echogramm mit rund 15 Rückwürfen und Nachhall auskommen sollte. Auf Grund dieser Überlegungen darf man annehmen, daß eine elektroakustische Nachbildung gemessener Rückwurffolgen durchführbar ist<sup>1</sup>. Durch das Fortlassen der klanglich nicht wirksamen Rückwürfe verändert man allerdings das Energieverhältnis von Nutz- und Störschall, was durch Einschieben unterschwelliger Rückwürfe wieder zu korrigieren wäre.

Die besonderen Erscheinungen bei Verzögerungen unter 2 ms bedürfen spezieller Untersuchungen. Bisher ist aus den Versuchen nur bekannt, daß bei Verdeckung durch Primärschall, vier Rückwürfe und Nachhall die aWs auch für Gleichzeitigkeit von Testschall und einem Rückwurf keine Abweichung vom gezeichneten Verlauf — etwa in Bild 10 — erkennen läßt, so daß besondere Schwellerniedrigungen nicht mehr erwartet werden. Auch die Abhängigkeit des Schwellenverlaufs vom Pegel des Primärschalls

<sup>1</sup> Das in Bild 11 gezeigte Beispiel ist auf Platz 46 der Reihe 27 im großen Saal der Liederhalle Stuttgart gemessen worden, als der Sender auf der Bühne stand. Es wurde aus einer Sammlung von 70 Aufnahmen aus der Liederhalle als ein vermutlich besonders schwer nachzubildendes Echogramm ausgewählt [22].

ist noch zu untersuchen; für einen Spezialfall sei auf BURGTORF verwiesen [17].

Herrn Professor Dr. Dr. E. h. E. MEYER danke ich für die Anregung zu dieser Arbeit, für viele wichtige Hinweise und sein stets förderndes Interesse.

Der Deutschen Forschungsgemeinschaft habe ich für die Bereitstellung von Sachmitteln zu danken.

(Eingegangen am 4. Januar 1961.)

#### Schrifttum

- [1] HAAS, H., *Acustica* **1** [1951], 49.
- [2] MEYER, E. und SCHODDER, G. R., *Nachr. d. Ak. Wiss. Göttingen Kl. II a* Nr. 6, 1952.
- [3] LOCHNER, I. P. A. und BURGER, J. F., *Acustica* **8** [1958], 1.
- [4] NICKSON, A. F. B., MUNCEY, R. W. und DUBOUT, P., *Acustica* **4** [1954], 515.
- [5] BOLT, R. H. und DOAK, P. E., *J. Acoust. Soc. Amer.* **22** [1950], 507.
- [6] NIESE, H., *HFTech. u. El.Ak.* **66** [1958], 70.
- [7] KRAAG, W., *HFTech. u. El.Ak.* **65** [1957], 91.
- [8] BOUTROS, R., *Diss. T. H. Karlsruhe* 1956.
- [9] KRAUTH, E., *NTF* **15** [1959], 51.
- [10] POLLACK, I. und PICKETT, J. M., *J. Acoust. Soc. Amer.* **30** [1958], 131.
- [11] ZEMKE, H. J., *NTF* **15** [1959], 56.
- [12] MEYER, E. und SCHODDER, G. R., *mündl. Mitteilung*.
- [13] HIRSCH, I., *J. Acoust. Soc. Amer.* **31** [1959], 759.
- [14] LÜSCHER, E. und ZWISLOCKI, J., *J. Acoust. Soc. Amer.* **21** [1949], 135.
- [15] RUBIN, H., *J. Acoust. Soc. Amer.* **32** [1960], 670.
- [16] STEIN, H. J., *Acustica* **10** [1960], 116.
- [17] BURGTORF, W., *Acustica* **11** [1961], 97.
- [18] STEINBERG, J. C. und MUNSON, W. A., *J. Acoust. Soc. Amer.* **8** [1936], 71.
- [19] SERAPHIM, H.-P., *Acustica* **8** [1958], 280.
- [20] SERAPHIM, H.-P., *Original der Diplomarbeit*, 1958 [19].
- [21] SCHODDER, G. R., *Acustica* **6** [1956], 445.
- [22] JUNIUS, W., *Acustica* **9** [1959], 289.

# EINE APPARATUR ZUR ELEKTROAKUSTISCHEN HERSTELLUNG EINFACHER SCHALLFELDER IN EINEM REFLEXIONSFREIEN RAUM

von W. BURGTORF und H.-P. SERAPHIM

III. Physikalisches Institut der Universität Göttingen

## Zusammenfassung

Es wird eine Anlage beschrieben zur Herstellung von Schallfeldern in einem reflexionsfreien Raum aus einem Primärschall und maximal 13 verschiedenen Rückwürfen mit Verzögerungen bis zu 350 ms. Die Anlage enthält Hilfseinrichtungen für Untersuchungen mit der Konstanzmethode und dem Beurteilungsverfahren.

## Summary

An apparatus for the presentation of special sound fields in an anechoic chamber is described. These sound fields consist of the primary sound and, at maximum, 13 reflexions with delay-times up to 350 ms. Supplementary equipment permits investigations using either the method of constant stimuli or a method of judgment.

## Sommaire

On décrit un appareil destiné à produire dans une salle sans réflexion un champ sonore composé d'un son primaire et de 13 réflexions artificielles au plus dont le retard atteint 350 ms. L'appareil contient des instruments supplémentaires permettant des recherches à l'aide d'une méthode des stimulations constantes ou à l'aide d'un procédé de jugement.

Unter Schallfeldern wird in der vorliegenden Arbeit die Kombination eines Primärschalles mit verschiedenen Rückwürfen verstanden. Dabei können sich die Rückwürfe durch ihre Verzögerungen, ihre Pegel und ihre Einfallsrichtungen unterscheiden. Zur Herstellung solcher Schallfelder werden in einem reflexionsfreien Raum verschiedene Lautsprecher — entsprechend der geforderten Verteilung der Einfallsrichtungen — aufgestellt und mit verzögerten und bedämpften Wiederholungen der primären Tonspannung gespeist. Sollen zwei verschiedene Schallfelder sukzessiv miteinander verglichen werden, so benötigt man zusätzlich eine Umschaltvorrichtung.

## 1. Überblick über die Apparatur

Vor der Beschreibung der einzelnen Geräte soll die Funktionsweise der Anlage an Hand des Blockschaltbildes (Bild 1) beschrieben werden.

Als Primärschall diente die direkte Wiedergabe einer Magnettonaufzeichnung durch das Speichermagnetophon (SP.M.) Als Rückwürfe wurden entsprechend verzögerte Wiederholungen des Primärschalles benutzt. An Verzögerungseinrichtungen standen drei Verzögerungsmagnetophone (V.M. 1 bis 3) und eine elektrische Laufzeitkette (LZK.) zur Verfügung. Insgesamt konnten damit 13 gegenüber dem

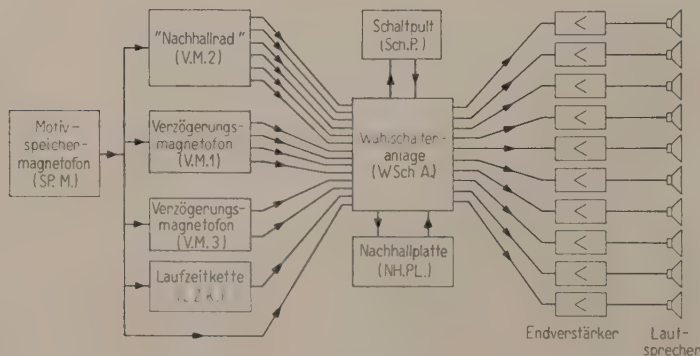


Bild 1. Blockschaltbild der Anlage.



Bild 2. Blick auf einen Teil der Verzögerungseinrichtungen (von links nach rechts: V.M. 2, LZK., V.M. 3).

Primärsignal verschieden stark verzögerte Wiederholungen hergestellt werden.

Eine Wahlschalteranlage verteilte die den Rückwürfen entsprechenden Tonspannungen fernschaltbar auf die nachfolgenden Endverstärker, welche die im reflexionsfreien Raum stehenden Lautsprecher speisten. Die Anlage bot zusätzlich die Möglichkeit, zwei verschiedene Tonspannungsverteilungen wechselweise herzustellen. Außerdem ermöglichte sie die Einspeisung von künstlichem Nachhall.

Für spezielle Versuchsmethoden erforderliche Hilfseinrichtungen vervollständigten die Apparatur.

## 2. Beschreibung der einzelnen Geräte

### 2.1. Das Speichermagnetophon (SP.M.)

Das für die Versuche benutzte nachhallfreie Motiv wurde auf Magnettonband gespeichert. Zur Wiedergabe diente ein Studiomagnetophon (Bandgeschwindigkeit 76 cm/s), das vom Norddeutschen Rundfunk zur Verfügung gestellt worden war. Nach entsprechenden Umbauten konnte wahlweise mit Bandspulnen oder mit endlosen Bandschleifen gearbeitet werden. Bei Schleifenbetrieb waren Motivdauern von 0,7 bis 8 s möglich.

Für Bandschleifen wurde das Agfa-Band PE 31 verwendet. Dieses Bandmaterial hatte sich in Vorversuchen wegen seiner günstigen mechanischen Eigenschaften als besonders geeignet erwiesen. Die Bandschleifen wurden nach maximal sechs Betriebsstunden ausgewechselt. — Eine Zusatzeinrichtung erlaubte es, die Umschaltungen (siehe 2.7) mit dem Schleifenumlauf zu synchronisieren.

### 2.2. Die Verzögerungseinrichtungen

#### 2.2.1. Philips-Stereomagnetophon (V.M. 1)

Speziell zur Erzeugung kleiner Verzögerungen diente ein umgebautes kommerzielles Stereogerät der Firma Philips. Bei diesem war der Hörkopf des zweiten Kanals verschiebbar angeordnet und erlaubte die Einstellung beliebiger Verzögerungen bis zu 70 ms. Auch bei diesem Gerät war die wahlweise Verwendung von Bandspulnen oder endlosen Bandschleifen möglich.

Der Frequenzgang aller Verzögerungseinrichtungen stimmte bis auf  $\pm 2$  dB überein und war gerade im Bereich von 0,06 bis 7 kHz. Die Dynamik war jeweils größer als 45 dB.

#### 2.2.2. Philips-Nachhallanlage (V.M. 2)

Mit diesem, ursprünglich nur für Nachhallerzeugung gebauten Gerät (vergleiche Bild 2) konnten sechs verschiedene Verzögerungen hergestellt werden. Die magnetisierbare Schicht war bei dieser Anlage auf dem Umfang eines Aluminiumrades aufgebracht. Aufsprech- und Wiedergabeköpfe standen ihr in einem Abstand von  $30 \mu$  gegenüber. Nach Erhöhung der Umfangsgeschwindigkeit des Rades von 1,5 auf 3 m/s betrug die kleinste erzielbare Verzögerung 16 ms, die größte 350 ms.

#### 2.2.3. „Vier-Kopf“-Magnetophon (V.M. 3)

Ein weiteres Verzögerungsmagnetophon ist in der Werkstatt des Institutes gebaut worden. Hiermit ließen sich vier Verzögerungen zwischen 45 ms und 340 ms herstellen. Die Geschwindigkeit der Band-



Bild 3.

Blick auf die Schalt- und Verstärkergestelle (von links nach rechts: WSchA., Verstärkergestell, SP.M.).

schleife betrug 157 cm/s. — Mit Hilfe zweier getrennter Aufspreichrichtungen ließen sich mit diesem Gerät auch wenig unterschiedliche Verzögerungen erzeugen.

#### 2.2.4. Laufzeitkette (LZK)

Schließlich war noch eine elektrische Laufzeitkette aus mehr als 500 LC-Gliedern vorhanden. Mit ihr ließen sich Verzögerungen bis zu 7,5 ms herstellen. Diese waren in Stufen von 0,5 ms veränderlich. Nach besonderen Korrekturen entsprach der Frequenzgang bei jeder einstellbaren Verzögerung dem der oben beschriebenen Magnetophongeräte.

Insgesamt war mit diesen Geräten die Herstellung von 13 verschiedenen verzögerten Wiederholungen des Primärsignals möglich. Zusammen mit diesem standen also 14 Tonspannungen am Eingang der Schaltanlage zur Verfügung.

#### 2.3. Die Wahlschalteranlage (WSchA.)

Die Wahlschalteranlage diente dazu, diese 14 Tonspannungen nach Wunsch auf die verschiedenen Verstärkerkanäle zu verteilen. Bei den mit Sukzessiv-vergleichen durchgeführten Versuchen wurde eine Reihe von Rückwürfen in beiden Schallfeldern gleichzeitig dargeboten. Die diesen Rückwürfen entsprechenden Tonspannungen wurden durch Steckverbindungen vor Beginn eines jeden Versuches an die Eingänge der gewählten Verstärkerkanäle gelegt.

In den Versuchen unterschieden sich die beiden zu vergleichenden Schallfelder stets nur durch die An beziehungsweise Abwesenheit eines weiteren Rückwurfes, des sogenannten Test-Rückwurfes. Dessen Verzögerung und Pegel mußte variabel sein. Welche der 13 verschieden verzögerten Tonspannungen für den Testschall verwendet werden sollte, wie stark

diese bedämpft und aus welchem Lautsprecher sie als Test-Rückwurf abgestrahlt wurde, sollte vom reflexionsfreien Raum aus zu bestimmen sein. Ein Telephondrehwähler erlaubte es, eine beliebige der 14 Tonspannungen abzugreifen und an den hochohmigen Eingang eines Trennverstärkers zu legen. An dessen wieder niederohmigen Ausgang war ein variables Dämpfungsglied angeschlossen (in 2-dB-Schritten von 0 bis -20 dB fernschaltbar). Es konnte durch einen von Hand zu bedienenden Flachbahnregler im reflexionsfreien Raum ersetzt werden. Ein weiterer Drehwähler schaltete die so bedämpfte Tonspannung an den Eingang des zu der gewünschten Einfallsrichtung gehörigen Verstärkers.

#### 2.4. Die Verstärkerkanäle

In einem Verstärkergestell (siehe Bild 3) standen insgesamt 10 niederohmige Verstärkerkanäle zur Verfügung. Als Vorregler dienten Flachbahnregler vom Typ B-W 44 (Maihak). Für die Verstärkung wurden Mischverstärker vom Typ VK 151 (Labor Wennebostel) verwendet. Benutzt wurden nur deren niederohmige Eingänge. Die Übersprechdämpfung betrug mindestens 34 dB, die Dynamik am Verstärkerausgang war größer als 42 dB.

In jedem Kanal waren zwei voneinander unabhängige Vorregler vorhanden. Wahlweise konnten die nachfolgenden Verstärker entweder an den einen oder an den anderen ihrer Vorregler geschaltet werden. Diese Umschaltung erfolgte für alle Verstärkerkanäle gleichzeitig. Welche der so entstehenden Vorreglergruppen gerade eingeschaltet war, wurde durch das Aufleuchten roter beziehungsweise grüner Lampen am Regler gekennzeichnet.

Diese Vorregler bedämpften die Tonspannungen derartig, daß die ihnen entsprechenden Rückwürfe

die jeweils erforderlichen Pegel hatten. Durch entsprechende Speisung der „roten“ und „grünen“ Vorreglergruppe war es also möglich, mit Hilfe eines einzigen Schalters die für die Herstellung verschiedener Schallfelder notwendigen Tonspannungen gegeneinander auszutauschen. Diese Umschaltung konnte auch von Hilfseinrichtungen gesteuert werden, zum Beispiel synchron mit dem Bandschleifenumlauf auf dem Speichermagnetophon.

In vier Kanälen waren die Vorregler doppelt vorhanden, so daß die gleichzeitige Einspeisung zweier Tonspannungen in einen Kanal möglich war. — Die Ausgangsspannungen der Verstärker konnten in einem Prüffeld gemessen werden.

### 2.5. Die Lautsprecher (Lsp.)

Es wurden hochwertige dynamische Lautsprecher benutzt. Sie waren in Holzkästen eingebaut. Durch Auskleidung mit Glaswolle wurden deren Resonanzen bedämpft. Diese Lautsprecherkästen waren auf Gestelle montiert und auf einem Kreis ( $r = 4\text{ m}$ ) um die Versuchsperson herum aufgestellt. Die Höhe der Lautsprecher entsprach dabei der Kopfhöhe des im Mittelpunkt sitzenden Beobachters. Sollte der Azimutwinkel mehrerer Lautsprecher gleich sein, wurden diese so übereinandergestellt, daß sie auf einem Meridiankreis lagen und alle auf die Versuchsperson gerichtet waren (Bild 4).

Als Versuchsraum wurde der große reflexionsfreie Raum des III. Physikalischen Institutes der Universität Göttingen benutzt<sup>1</sup>. Bei der beschriebenen Auf-

stellung der Lautsprecher wurde eine Deckenreflexion mit einer Verzögerung von 9 ms und einem Pegel von  $-25\text{ dB}$  gegenüber dem des direkt einfallenden Schalles am Platz der Versuchsperson beobachtet. — Von der Vorderwand eines in entgegengesetzter Richtung stehenden Lautsprecherkastens reflektierter Schall erreichte den Beobachterplatz um 26 ms später als der Direktschall und war mindestens um 26 dB schwächer als dieser. Es läßt sich zeigen, daß die genannten Reflexionen keine schwellbestimmende Rolle spielen und daher das Meßergebnis nicht beeinflussen.

Zur Kontrolle der Schallpegel war am Platz der Versuchsperson im reflexionsfreien Raum ein hochwertiges Kondensatormikrophon mit kugelförmiger Richtcharakteristik angebracht. Mit seiner Hilfe wurden vor Beginn eines jeden Versuches auch alle Lautsprecher auf Phasengleichheit überprüft.

### 2.6. Die Nachhallplatte (NH.PL.)

Zur Herstellung künstlichen Nachhalls wurde ein „Nachhall-Erzeugungsgerät EMT 140“ verwendet<sup>2</sup>. In diesem wird ein Stahlblech durch das Eingangssignal zu Biegeschwingungen angeregt und wirkt wie ein zweidimensionaler Hallraum. Das verhallte Signal wird mit Hilfe von Körperschallmikrophonen abgenommen. Dadurch, daß man dem schwingenden Blech eine poröse Dämpfungsplatte mehr oder weniger nähert, kann man dessen Dämpfung — und damit die Nachhallzeit — in weiten Grenzen kontinuierlich regeln. Es waren Nachhallzeiten zwischen 0,8 und 5,5 s einstellbar.

<sup>1</sup> E. MEYER, G. KURTZE, H. SEVERIN und K. TAMM, Ein neuer großer reflexionsfreier Raum für Schallwellen und kurze elektromagnetische Wellen. *Acustica* 3 [1953], 409.

<sup>2</sup> Das Gerät wurde von der Herstellerfirma Elektromechanik W. Franz KG dankenswerter Weise als Leihgabe zur Verfügung gestellt.



Bild 4. Lautsprecheraufstellungen im reflexionsfreien Raum.

Der Aufbau des künstlichen Nachhalls mußte dem oft langsameren natürlicher Räume angeglichen werden können. Ein Mischfeld erlaubte es, die Nachhallplatte mit den einer Folge von Rückwürfen ansteigenden Pegels entsprechenden Tonspannungen zu speisen. Der Aufbau des Nachhalls erfolgte dann stufenweise.

### 2.7. Hilfseinrichtungen

Für den sukzessiven Vergleich zweier Schallfelder mußten in der Wahlschalteranlage zwei verschiedene Tonspannungsverteilungen wechselweise hergestellt werden. Die Umschaltung von einer Verteilung zur anderen konnte mit dem Umlauf der Motivbandschleife synchronisiert oder von einem Schaltmotor gesteuert werden. Dieser trieb eine Nockenwelle an, deren verstellbare Nocken den Schaltkontakt betätigten. Ein Umlauf dieser Welle dauerte 6 s.

Bei Messungen nach der Konstanzmethode hört der Beobachter eine Folge zweier abwechselnder Darbietungen: konstanten Bezugsreiz und variablen Vergleichsreiz. Seine Aufgabe ist es, zu entscheiden, welche der Darbietungen nach seiner Meinung der Vergleichsreiz ist. Um diese Entscheidung auszudrücken, muß er die Darbietungen benennen können. Dazu werden diese durch verschiedenfarbige Lampen gekennzeichnet. Die Markierung darf jedoch keinen Hinweis auf den tatsächlichen Unterschied der Darbietungen enthalten. Das wird erreicht, wenn die Zuordnung von Lampenfarbe und Reiz in unregelmäßiger Folge wechselt. Hierzu lieferte ein erster Telephondrehwähler mit 52 Schalt-

stellungen eine 52-gliedrige ausgewürfelte Folge solcher Zuordnungen.

Da weder Versuchsleiter noch Versuchsperson wissen sollten, welche Zuordnung gerade bestand, durften sie auch die Richtigkeit einer Entscheidung nicht unmittelbar selbst prüfen können. Eine Relaisanordnung verglich Entscheidung und Zuordnung; am Ausschlag eines Instrumentes war dann zu erkennen, ob die Entscheidung richtig oder falsch war.

Der Beobachter durfte auch weder aus dem Rhythmus noch aus dem Beginn der Darbietungsfolge auf die richtige Antwort schließen können. Darum war die Dauer beider Darbietungen gleich, und die Darbietungsfolge begann in unregelmäßigem Wechsel ebenso oft mit dem Bezugsreiz wie mit dem Vergleichsreiz. Dieser unregelmäßige Wechsel wurde durch eine andere 52-gliedrige Folge hergestellt und mit Hilfe eines zweiten Telephondrehwählers mit 52 Schaltstellungen geschaltet.

Für Messungen mit dem Beurteilungsverfahren war außer einem Regler auch ein Schalter zum Abschalten des Testschalles am Platz der Versuchsperson vorhanden.

Herrn Prof. Dr. Dr. E. h. E. MEYER danken wir für die Anregung zu dieser Arbeit sowie für sein stets förderndes Interesse und zahlreiche wertvolle Ratschläge. Herrn Dr. G. R. SCHODDER wird für seine Mitarbeit bei Vorplanung und Bau der Apparatur gedankt. — Der Deutschen Forschungsgemeinschaft haben wir für zur Verfügung gestellte Sachmittel zu danken.

(Eingegangen am 7. Januar 1961.)

### Buchbesprechung

P. H. PARKIN, H. J. PURKIS and W. E. SCHOLES. *Field Measurements of Sound Insulation between Dwellings*. Her Majesty's Stationary Office, London 1960, 571 Seiten, 96 Abbildungen.

Das Buch besteht aus einem Textteil von 100 Seiten und einer Sammlung von 464 Datenblättern, von denen jedes die Schallschutz-Meßergebnisse einer bestimmten Decken- oder Wandbauart wiedergibt, zusammen mit den Grundriß- und Schnittskizzen des jeweiligen Meßobjekts.

Der Textteil enthält in seinem ersten Abschnitt eine kurze Einführung in die Theorie des Schalldurchganges durch flächenhafte Bauteile, beschreibt Meßmethode und -genauigkeit und kommentiert schließlich gruppenweise die Meßergebnisse, die an Massivdecken, Wänden und Holzbalkendecken gewonnen wurden. Der zweite Abschnitt berichtet, auf welche Weise das in England empfohlene Bewertungssystem zustandekam.

Parallel mit den Messungen in Wohnbauten wurden unter den Mietern dieser Häuser umfangreiche Befragungen über Geräuschbelästigungen durchgeführt und daraus errechnet, wieviel Prozent von ihnen zum Beispiel bestimmte Geräusche aus Nachbarwohnungen hören und wieviel sich von diesen Geräuschen gestört

fühlen. Die im zweiten Abschnitt mitgeteilten Ergebnisse dieser Befragungen sind unter anderem insofern sehr interessant, als sie auch die Lebensgewohnheiten des Durchschnitts-Engländers widerspiegeln. Während in Deutschland solche Befragungen bisher nicht durchgeführt wurden, sind deren Ergebnisse in England bei der Festlegung der Schallschutz-Klassen („grades“) — „House standard“ für Zweifamilien- oder Reihen-Häuser sowie „grade I“ und „grade II“ für Mehrfamilien-Häuser — mitbestimmend gewesen („grade I“ und „grade II“ entsprechen mittleren Schalldämmungen von etwa 50 beziehungsweise 45 dB, „House-standard“ der Dämmung einer 1-Stein-Vollziegelwand, die Klassen für den Trittschallschutz gehen aus dem Buch nicht hervor.)

Die Dämmungs-Meßergebnisse der Datenblätter sind als Normpegeldifferenzen wiedergegeben, bezogen auf  $A_0 = 10 \text{ m}^2$  für das Korrekturglied der Auswertformel. Da alle Daten der Meßobjekte mitaufgeführt sind, ist ein Vergleich der Ergebnisse mit anderen Auswertformeln, die zum Beispiel das Korrekturglied auf die Schalldurchtrittsfläche beziehen, möglich.

Die Veröffentlichung einer so großen Zahl von Ergebnissen einheitlich durchgeführter Schallschutz-Messungen ist sehr zu begrüßen.

G. VENZKE

# UNTERSUCHUNGEN ZUR WAHRNEHMBARKEIT VERZÖGERTER SCHALLSIGNALLE

von W. BURGTORF

III. Physikalisches Institut der Universität Göttingen

## Zusammenfassung

Es wird ein apparatives und methodisches Verfahren zur Beurteilung einer speziellen subjektiven Wirkung eines einfachen Schallfeldes beschrieben. Dieses Schallfeld — bestehend aus Primärschall und einem oder mehreren Rückwürfen — wird mit elektroakustischen Mitteln erzeugt und der Versuchsperson in einem reflexionsfreien Raum dargeboten.

Die „absolute Wahrnehmbarkeitsschwelle“ (aWs) wird in ihrer mannigfaltigen Abhängigkeit von den einzelnen Bestimmungsgrößen der jeweiligen Schallfeldkonstellation gemessen.

Es ergibt sich ein Anstieg der aWs mit dem Pegel des Primärschalles. Der Einfluß der Länge der verwendeten Schallsignale wird untersucht für den Fall der Richtungsgleichheit von Primär- und Sekundärschall. Bei Richtungsungleichheit der beiden Schallsignale wird die aWs in Abhängigkeit von der Schalleinfallrichtung angegeben. Der Einfluß eines weiteren zusätzlichen Rückwurfes auf den Verlauf der aWs wird in Abhängigkeit von seiner Verzögerung und Einfallrichtung beschrieben. — Die Zulässigkeit von Selbstversuchen wird belegt.

Aus den Ergebnissen, deren Fehler kleiner als  $\pm 1,5$  dB ist, ergeben sich vielfach Hinweise auf die subjektive Wirkung natürlicher Schallfelder. Eine Möglichkeit für weiterführende Untersuchungen wird angedeutet.

## Summary

Apparatus and methods are described for the judgment of a special subjective effect of a simple sound field. The sound field—consisting of a primary sound and one or more echoes—is generated by electroacoustic means and presented to the test person in an anechoic room.

The “absolute threshold of perceptibility” (absolute Wahrnehmbarkeitsschwelle or “aWs”) is measured as a function of the different sound field parameters.

It follows that the absolute threshold of perceptibility increases with increasing level of the primary sound. The influence of the duration of the sound signals is investigated for primary sound and echoes coming from the same direction. For signals coming from different directions the absolute threshold of perceptibility is given as function of the direction of incidence of the signals. The influence of an additional (second) echo on the absolute threshold of perceptibility is described as a function of delay time and direction of incidence of the additional echo. — The admissibility of self-tests is proved.

From the results, the measuring error being less than  $\pm 1,5$  dB, many indications are given to the subjective effects of natural sound fields. A possibility of further investigations is discussed.

## Sommaire

On décrit une méthode expérimentale étudiant une action subjective spécifique d'un champ sonore simple. Ce champ, composé d'un son primaire accompagné d'une ou plusieurs réflexions, est produit par un procédé électroacoustique et agit sur l'observateur dans une salle sans écho.

Le seuil absolu de perceptibilité (absolute Wahrnehmbarkeitsschwelle ou «aWs») est mesuré en fonction des différents paramètres du champ sonore proposé.

On a trouvé que l'aWs croît avec le niveau du son primaire. L'influence de la durée des signaux acoustiques utilisés a été étudiée dans le cas où les directions du son direct et du son retardé sont les mêmes. Dans le cas où ces directions sont différentes, l'étude de l'aWs a été faite en fonction de la direction du champ incident. La variation de l'aWs causée par une réflexion supplémentaire a été étudiée en fonction de son temps de retard et de sa direction d'incidence. On a montré que les expériences que l'on fait soi-même sont comparables.

Les résultats d'expériences, dont l'incertitude est inférieure à 1,5 dB, donnent d'importantes indications sur les effets subjectifs de champs sonores naturels. On signale la possibilité de recherches ultérieures.

## 1. Einleitung und Fragestellung

In der Raumakustik sind zahlreiche Verfahren bekannt [1], [2], [3], [4], [5], [6], die in Räumen auftretenden Schallfelder auszumessen und mit Hilfe entsprechend definierter Kenngrößen rein objektiv, das heißt akustisch-physikalisch, zu beschreiben. Eine zusätzliche eingehende Kenntnis der subjektiven Auswirkungen dieser Kenngrößen sowie ihrer wechselseitigen Verkopplungen würde ermöglichen, einem Raum für spezielle Verwendungszwecke eine in jeder Hinsicht optimale „Hörsamkeit“ zu geben.

Die Frage nach einer Verknüpfung dieser akustisch-physikalischen Größen mit ihren subjektiven Korrelaten führt zu der Aufgabe, Schallfelder, wie sie in wirklichen Räumen vorkommen, hinsichtlich ihrer subjektiven Wirkungen zu untersuchen. Hierzu stehen prinzipiell mehrere Möglichkeiten offen.

Die Methode, bei der in einem verkleinerten Modell des zu untersuchenden Raumes mit Ultraschall gearbeitet wird, ist bekannt [7]. Mit Hilfe eines besonderen Verfahrens wird das von einem „Kunstkopf“ empfangene Signal der beurteilenden Versuchsperson über Kopfhörer dargeboten. Mit einem derartigen Modell lassen sich zahlreiche raumakustische Fragen untersuchen. Wie bei jeder Kopfhörerübertragung gehen aber auch hier spezielle Richtungsphänomene verloren. Es sind Untersuchungen bekannt, die sich mit einer Lösung dieses besonderen Problems befassen [8].

Eine andere Möglichkeit wäre, daß die Versuchsperson das zu untersuchende Schallfeld direkt beurteilt; dazu müßten in den Schallfeldern von Räumen Abhörversuche durchgeführt werden. Diese Methode hat aber so viele Nachteile und führt zu solchen Schwierigkeiten, daß man mit ihr kaum zu exakten Ergebnissen kommen kann. Die Schallfeldkonstellationen sind nicht frei wählbar, sondern durch die Raumeigenschaften festgelegt. Ein Direktvergleich verschiedener Schallfelder ist also unmöglich. Desgleichen ist eine getrennte Untersuchung von Einzelphänomenen, wie die starker Rückwürfe oder besonderer Nachhallformen, nicht durchführbar.

Aussichtsreich erscheint nun die Methode, Schallfelder zu untersuchen, die mit rein elektroakustischen Hilfsmitteln nachgebildet werden. Rein theoretisch ist dieses Verfahren leicht zu verwirklichen. Man stelle in einem reflexionsfreien Raum so viele Lautsprecher auf, wie Schalleinfallrichtungen vorhanden sind und speise diese in bezug auf Amplitude und Zeitverzögerung so, wie es den Verhältnissen in einem wirklichen Schallfeld entspricht. Die praktische Ausführung dieser Überlegung würde aber von vornherein bereits an dem zu betreibenden Aufwand scheitern.

Das Problem ist nun, welche Vereinfachungen eingeführt werden können, zum Beispiel wie weit es möglich ist, aus verschiedenen Richtungen einfallende Rückwürfe zu einem zusammenzufassen, mehrere zeitlich auseinanderliegende Rückwürfe zusammenzulegen oder subjektiv nicht bemerkbare Rückwürfe beziehungsweise Schalleinfallrichtungen auszulassen usw.

Nach Lösung all dieser Fragen sollte sich — mit einem verträglichen Aufwand — eine Nachbildung durchführen lassen. Diese wäre aber nur insoweit „natürlich“, als das akustische Geschehen in einem Raum „richtig“ dargeboten würde. Ob und wie weit andere Einflüsse — zum Beispiel optischer Art —, die natürlich unberücksichtigt bleiben müssen, für die subjektive Beurteilung von Bedeutung sind, bleibt völlig offen. Es ließen sich also unter quasi natürlichen Bedingungen objektiv meßbare Kenngrößen von Schallfeldern, wie etwa der Nachhall, die Diffusität oder der 50 ms-Energieanteil, in ihren subjektiven Wirkungen untersuchen und die Unterschiedsschwellen solcher Größen sowie ihre gegenseitige Beeinflussbarkeit messen.

Zur Verwirklichung eines solchen Verfahrens bedürfen aber zunächst sehr viele Einzelfragen einer weitgehenden Klärung. In der Literatur finden sich zahlreiche Arbeiten, welche in diesem Zusammenhang interessierende Einzelphänomene untersuchen [9], [10], [11], [12], [13]. Die Behandlung der Wirksamkeit von Einzelschallwürfen steht dabei im Vordergrund.

In der vorliegenden Arbeit soll das Zusammenwirken eines Primärschalles mit einem oder mehreren verzögerten gleichartigen Schallsignalen, die im allgemeinen als Rückwürfe aufgefaßt werden können, untersucht werden. Zu diesem Zweck werden mit elektroakustischen Hilfsmitteln einfache Schallfelder gebildet und mit Hilfe einer besonderen Methode ihre subjektiven Wirkungen gemessen. Im Gegensatz zu den meisten bekannten Arbeiten wird das Schwergewicht darauf gelegt, grundsätzliche Fragen zu klären, die sich aus dem Zusammenspiel oben erwähnter Schallereignisse ergeben.

## 2. Meßmethode und Definitionen

Um die Messung der subjektiven Wirkungen von Schallfeldern durchführen zu können, wurde eine spezielle Apparatur entworfen und gebaut<sup>1</sup>. Eine ausführliche Beschreibung findet sich in der Arbeit von BURGTORF und SERAPHIM [14].

Bei den Versuchen folgten auf einen Primärschall ein oder mehrere verzögerte gleichartige Schall-

<sup>1</sup> Herrn Dr. G. R. SCHODDER wird gedankt für Vorplanung und Mithilfe bei der Erstellung dieser Apparatur.

signale; es sollte gemessen werden, unter welchen Bedingungen es bei der jeweiligen Versuchsanordnung gelingt, ein bestimmtes dieser verzögerten Schallsignale an die Grenze seiner Wahrnehmbarkeit zu bringen. Der Ablauf der Versuche war prinzipiell immer der gleiche. Eine bestimmte Schallfeldkonstellation — beschrieben durch die Verzögerungen der einzelnen Schallsignale, durch ihre Einfallsrichtungen, ihre Schallpegel und eventuell auch durch ihre Länge — wurde der Versuchsperson im reflexionsfreien Raum vorgegeben. Diese Schallfeldkonfiguration konnte denjenigen Schall, nach dessen „Wahrnehmbarkeit“ gefragt wurde, noch zusätzlich enthalten oder nicht. Es gab also zwei Schallfelder, die sich objektiv voneinander unterschieden. Ob sie auch subjektiv, das heißt in dem Eindruck, den sie bei der beurteilenden Versuchsperson hervorriefen, in irgendeiner Weise unterscheidbar waren, hatte die Versuchsperson zu beantworten. Zulässig und möglich waren also nur die Antworten „ja“ (das heißt, es wurde irgendein Unterschied festgestellt) oder „nein“ (das heißt, es war kein Unterschied feststellbar). Die unter diesen Bedingungen gemessene Schwelle werde als „absolute Wahrnehmbarkeitsschwelle“ für das untersuchte Schallsignal bezeichnet. Sie wird im folgenden mit aWs abgekürzt. Der Vorsatz „absolut“ soll ausdrücken, daß das Kriterium (Lautstärkeerhöhung, zusätzliche Schalleinfallrichtung, Klangfarbenänderung usw.), welches die Versuchsperson befähigte, einen Unterschied zu hören, bei der Beurteilung nicht berücksichtigt werden sollte.

Diese Art, eine Schwelle zu definieren, liefert die niedrigste überhaupt meßbare Schwelle, sofern ein geeignetes Meßverfahren benutzt wird [15]. Die Abkürzung aWs könnte also auch als „äußerste Wahrnehmbarkeitsschwelle“ gelesen werden. Die aWs hat den Vorteil, daß sie durch die Art ihrer Definition zwei grundsätzlich voneinander verschiedene Bereiche trennt, nämlich den der Wahrnehmbarkeit und den der Nichtwahrnehmbarkeit eines speziellen Schallereignisses.

Es ist nun natürlich ohne weiteres möglich, andere Schwellen zu definieren und auch zu messen, wie es in anderen Arbeiten geschehen ist [9], [10], [11], [12], [13]. Man braucht zum Beispiel lediglich danach zu fragen, auf welche Art und Weise ein beobachteter Unterschied sich bemerkbar macht, etwa als Echo — welches wiederum stark, schwach, störend oder nicht störend sein kann —, als eine Veränderung in der Klangfarbe oder als Auftreten einer zusätzlichen Schalleinfallrichtung, um nur einige Möglichkeiten zu nennen. Die Schwierigkeit des Arbeitens mit solchen Schwellen liegt einerseits in der Unsicherheit der empfindungsmäßig eindeutigen Abgrenzung derartig definierter Schwellen von

einander, da es sich um gleitende Übergänge handelt, andererseits darin, daß derartige Unterschiedsmerkmale sehr wohl auch gleichzeitig auftreten können (etwa störender Rückwurf und Auftreten einer zusätzlichen Schalleinfallrichtung).

Für die raumakustische Praxis — gemeint ist die Frage nach der „Hörsamkeit“ eines Raumes — sind häufig gerade diese Dinge von Interesse. Hier liegt nun auch ein Nachteil der oben definierten absoluten Wahrnehmbarkeitsschwelle. Für diese werden sich Werte ergeben, die für die raumakustische Praxis im allgemeinen zu niedrig liegen. Dieser Nachteil wird bewußt in Kauf genommen. Handelt es sich doch hier um Untersuchungen, die in erster Linie grundsätzlicher Natur sind und erst in zweiter Linie auf akustische Nutzenanwendungen hinführen sollen.

Wie aus dem Gesagten bereits hervorgeht, wurde die aWs mit der Methode des Sukzessivvergleiches gemessen. Die in diesem Zusammenhang interessierenden Einzelheiten des apparativen Aufbaues der Versuchsanordnung werden in der Arbeit von BURGTORF und SERAPHIM beschrieben [14].

Die Versuchsperson konnte mit einem geeichten Flachbahnregler den Schallpegel des zu beurteilenden verzögerten Schallsignales von Hand variieren. Alle Messungen wurden praktisch nur im Selbstversuch ausgeführt. Auf die Durchführung von langwierigen Versuchsreihen mit zahlreichen ungeübten Versuchspersonen, die bei der Vielzahl der zu untersuchenden Parameter ein Vielfaches an Zeitaufwand bedingt hätte, wurde verzichtet. Eine einzige geübte Versuchsperson liefert, bei entsprechender Durchführung der Versuche, nahezu dieselben Ergebnisse [15], [16].

Die in der Arbeit dargestellten Meßergebnisse sind Mittelwerte zahlreicher Einzelmessungen (je nach Schwierigkeit der Beurteilung 10 bis 25 Urteile). Es wurden häufig Vergleichsmessungen durchgeführt, und zwar sowohl mit geübten als auch mit ungeübten Versuchspersonen, die stets eine im Rahmen der Meßgenauigkeit liegende Bestätigung der eigenen Messungen erbrachten. Für alle Meßergebnisse ist der Fehler kleiner als  $\pm 1,5$  dB.

Die für den Sukzessivvergleich notwendige Umschaltung zwischen den beiden zu vergleichenden Schallfeldern erfolgte meist von Hand. Diese Art der Versuchsdurchführung — im Gegensatz zu einer solchen mit automatischer, statistisch gesteuerter Umschaltung — erwies sich als vorteilhaft, denn die Selbstumschaltung gestattete, besonders im Falle eindeutiger Entscheidungen, ein rasches Arbeiten. Sie erforderte aber eine sehr starke Konzentrationsbereitschaft. Um die Sicherheit des Urteilens nicht zu beeinträchtigen, wurden daher die einzelnen Versuchssitzungen nie über die Dauer einer halben Stunde ausgedehnt. Diese Methode des Sukzessiv-

vergleiches wird als Beurteilungsverfahren bezeichnet [17].

Zeigte sich vorhin, welche Vielfalt an Möglichkeiten allein schon in der Wahl des zu benutzenden Schwellenkriteriums liegt, so gilt Ähnliches auch für die Wahl des zu benutzenden Motives. Fortlaufende Sprache oder Musik, die in der akustischen Praxis wohl die gängigsten „Schallarten“ darstellen, erscheinen für grundsätzliche Untersuchungen als viel zu kompliziert.

Aus diesem Grunde wurde zunächst nur mit rechteckförmigen Impulsen aus breitbandigem weißem Rauschen gearbeitet, die in ihrer Länge und zeitlichen Lage zueinander leicht und wohl definiert veränderlich waren. Ein Blockschaltbild der für die Erzeugung dieser Schallsignale benutzten Apparatur zeigt Bild 1. Als Folgefrequenz der Impulse wurde

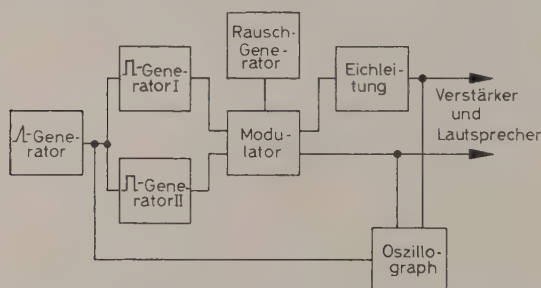


Bild 1. Blockschaltbild für die Impulserzeugung.

stets 1 Hz gewählt, um sicher zu sein, daß alle durch einen Impuls ausgelösten Wirkungen bis zur Ankunft des nächsten bereits wieder völlig abgeklungen waren. Die Längen der Impulse, die die Generatoren I und II lieferten, waren unabhängig voneinander in einem weiten Bereich (1 bis 120 ms) variabel. Die zeitliche Lage der Impulse zueinander ließ sich beliebig im Bereich von 0 bis 500 ms einstellen. Die Längen und die Zeitabstände der Impulse wurden mit einem geeichten Oszillographen gemessen. Der verzögerte Impuls konnte in seiner Amplitude geeicht abgeschwächt werden. Mit Hilfe eines Meßmikrophons wurde der Schallpegel der beiden Impulse vor Beginn eines jeden Versuches mit einer Genauigkeit von  $\pm 0,5$  dB auf gleich eingestellt. Die Versuche wurden im reflexionsfreien Raum ausgeführt. Jedes Schallsignal wurde über einen eigenen Lautsprecher abgestrahlt. Die Lautsprecherunterschiede hinsichtlich des Frequenzganges waren vernachlässigbar. Die etwas voneinander abweichenden Wirkungsgrade wurden einmal ermittelt und bei der Auswertung der Meßergebnisse immer berücksichtigt. Die zu dieser Apparatur gehörigen Geräte waren zum Teil im reflexionsfreien Raum neben dem Platz der Versuchsperson aufgebaut. Ein durch ihren Betrieb bedingtes Stör-

geräusch begrenzte die Dynamik auf etwa 60 dB. Wenn im folgenden von einer „Hörschwelle“ die Rede ist, so ist die durch dieses Störgeräusch bedingte Schwelle gemeint. — Die Apparatur, die bei der Verwendung von Sprache als Motiv benutzt wurde, ist in der Arbeit von BURGTORF und SERAPHIM beschrieben [14].

Der Primärschall wird im folgenden stets mit  $S_0$  bezeichnet. Ein gegenüber diesem um  $\Delta t$  verzögert einfallender Schall wird mit  $S_{\Delta t}$  gekennzeichnet. Als Verzögerung  $\Delta t$  gilt der Zeitunterschied in ms zwischen den Anfangsflanken von Primärschall und verzögertem Schall. Ist keine weitere Indizierung vorhanden, so bedeutet das, daß die beiden Schallsignale hinsichtlich ihrer zeitlichen Länge identisch sind. In diesem Falle darf das verzögerte Signal als Rückwurf betrachtet werden. Diese Bezeichnung ist aber nicht mehr zulässig, wenn  $S_0$  und  $S_{\Delta t}$  eine verschiedene Zeitdauer haben. Diese wird als zusätzlicher Index oben rechts an die Bezeichnungen  $S_0$  und  $S_{\Delta t}$  geschrieben.  $S_{40}^{10}$  kennzeichnet demnach ein 10 ms langes Schallsignal mit einer Verzögerung von 40 ms.

### 3. Ergebnisse

#### 3.1. Messungen bei Richtungsgleichheit von Primärschall und gegenüber diesem verzögerten Schallsignal

Für die Versuche bei Richtungsgleichheit wurden die benutzten Lautsprecher aufeinandergestellt. Dabei ergab sich zwangsläufig eine Abweichung von etwa  $5^\circ$  in vertikaler Richtung von exakter Richtungsgleichheit, die aber vernachlässigt werden mußte, da größter Wert darauf gelegt wurde, daß jeweils alle in einem Versuch vorkommenden Schallsignale aus verschiedenen Lautsprechern abgestrahlt wurden.

##### 3.1.1. Abhängigkeit der aWs vom Schallpegel

In einem ersten Versuch wurde gemessen, wie die aWs eines 50 ms später als der Primärimpuls ( $S_0$ ) einfallenden Sekundärimpulses ( $S_{50}$ ) von dem Schallpegel des  $S_0$  abhängt. Jeder der beiden Impulse hatte eine Zeitdauer von 50 ms. Beide Impulse fielen von vorn ein. Diese Einfallsrichtung wird im folgenden häufig als  $0^\circ$ -Richtung bezeichnet. Der in diesem Versuch vorkommende Maximalpegel für den  $S_0$  betrug 95 dB über  $2 \cdot 10^{-4}$  dyn/cm<sup>2</sup>.

In Bild 2 ist in Abhängigkeit von dem Schallpegel des  $S_0$  derjenige Schallpegel des  $S_{50}$  dargestellt, bei dem der  $S_{50}$  eben wahrnehmbar wird. Dieser Pegel steigt mit dem des  $S_0$  an, allerdings in schwächerem Maße als jener. Wird also ein nach 50 ms einfallender Sekundärimpuls mit einem Schallpegel  $L_1$  eben gerade noch verdeckt durch

einen Primärimpuls des Pegels  $L_2$ , so wird ein um  $\Delta L$  lauterer  $S_{50}$  erst verdeckt durch einen um ein Vielfaches von  $\Delta L$  lauterer  $S_0$ .

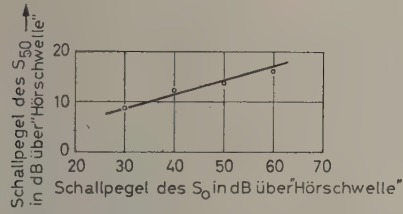


Bild 2. aWs als Funktion des Schallpegels.

Die Wahrnehmbarkeit eines Rückwurfes ist also nicht nur bestimmt durch die Pegeldifferenz zwischen Primärschall und Rückwurf sowie dessen Verzögerung, sondern zusätzlich muß der Schallpegel des Primärschalles berücksichtigt werden. Gleiche, etwa in einem Echogramm dargestellte Rückwurf folgen werden also schon allein aus diesem Grund subjektiv unterschiedlich bewertet werden können.

Zu einem weiteren Ergebnis gelangt man durch folgende Betrachtung. Ein Impuls, der dem Gehör dargeboten wird, ruft dort eine von seiner Länge und Amplitude abhängige nervöse Erregung hervor<sup>2</sup>. Ist die Reizeinwirkung, das heißt der Impuls, zu Ende, so wird für eine gewisse Zeit noch eine Nacherregung vorhanden sein. Durch diese ist die aWs eines zweiten, dem ersten folgenden Impulses bestimmt. Ein zweiter Impuls wird also nur dann wahrgenommen werden können, wenn er mit seiner Amplitude diese mit der Zeit sinkende aWs erreicht oder überschreitet. Bild 3 soll dieses veranschaulichen. Trägt man obige Ergebnisse in dieser Art

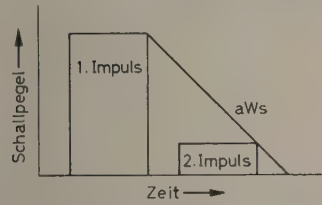


Bild 3. Zur Deutung der aWs.

auf, so ergibt sich, daß mit zunehmendem Schallpegel des  $S_0$  die Zeitkonstante des Absinkens der aWs immer kleiner wird, und zwar in der Art, daß die Schwellkurven praktisch alle zur selben Zeit nach Ende des ersten Impulses die „Hörschwelle“ wieder erreichen (Bild 4). Die sich hierbei er-

gebende Zeit von 70 ms für den Abfall der aWs ist vermutlich zu klein, da es sich eher um einen mit der Zeit exponentiellen Abfall handeln dürfte (vergleiche Bild 10). Nach einer Reizeinwirkung wird sich jedes der in Erregung versetzten nervösen Elemente für sich wieder auf seinen Anfangszustand einstellen. Dies muß unabhängig von anderen Elementen geschehen, denn sonst würde bei verschiedenen Schallpegeln nicht nach immer der gleichen Zeit die „Hörschwelle“ (Anfangszustand) wieder erreicht werden. Diese Betrachtung obiger Meßergebnisse führt also auf das bekannte Ergebnis, daß die Dauer des „Nacheffektes“ unabhängig vom Schallpegel ist [18], [19], [20].

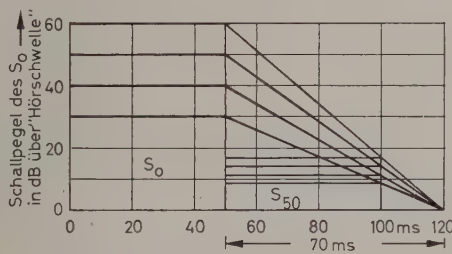


Bild 4. Umzeichnung von Bild 2.

3.1.2. Abhängigkeit der aWs von der Impulslänge und der Verzögerung

Nun wurde die Abhängigkeit der aWs von der Länge des Primärimpulses untersucht. Als Primärschall dienten 10, 50 oder 100 ms lange Impulse. Ihr Pegel betrug, wie auch bei allen anderen Impulsmessungen, 75 dB über  $2 \cdot 10^{-4}$  dyn/cm<sup>2</sup>. Der  $S_{dt}$  hatte eine Länge von 50 ms. Beide Impulse fielen wieder von vorn ein. Die in Bild 5 dargestellten Schwellkurven zeigen mit der Länge des Primärimpulses als Parameter sehr verschiedenartige Formen. Generell gilt, daß sie mit zunehmender Länge des  $S_0$  in Richtung auf größere Zeiten hin verschoben sind. — Gemeinsam ist ihnen, daß sie alle in die „Hörschwelle“ des  $S_{50}^{50}$  einmünden. Ein  $S_0^{10}$  verdeckt sehr gering verzögerte Impulse nur wenig. Die aWs liegt sehr tief. — Für eine Primärimpuls-

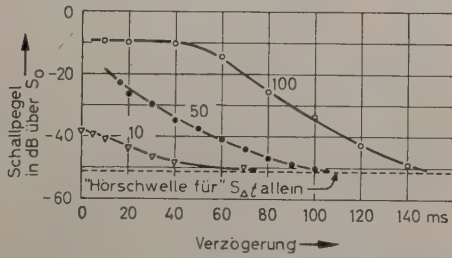


Bild 5. aWs für einen 50 ms langen Sekundärimpuls als Funktion seiner Verzögerung; Parameter: Impulslänge des  $S_0$  in ms.

<sup>2</sup> Wenn an dieser wie auch an anderen Stellen der Arbeit auf nervöse Vorgänge hingewiesen wird, so geschieht es nur im Sinne eines Versuches zur Deutung der gefundenen Meßergebnisse. Aussagen über das wirkliche neuronale Geschehen wären nur im Rahmen einer physiologisch-akustischen Facharbeit möglich und sollen darum hier auch nicht gemacht werden.

länge von 50 ms läßt sich für kleine  $\Delta t$  die aWs relativ schlecht messen, da die beiden sich überlagernden Impulse einen einheitlichen Eindruck hervorrufen, sich also nicht getrennt wahrnehmen lassen. Der Einfluß des Sekundärimpulses ist nur durch eine Lautstärkeerhöhung erkennbar. Eine Extrapolation auf  $\Delta t = 0$  ms ergibt eine Absenkung der aWs um 10 bis 12 dB gegenüber dem Pegel des  $S_0$ . Dieser Wert ist auch zu erwarten, da die Addition eines Schalles mit einem um 10 bis 12 dB leiseren eine gerade an der Grenze der Wahrnehmbarkeit liegende Lautstärkeerhöhung ergibt. — Die Kurve für einen  $S_0^{100}$  beginnt mit einem fast waagerechten Verlauf. Der nur halb so lange  $S_{\Delta t}$  „geht quasi unter“ in dem Primärimpuls. Seine Anwesenheit macht sich wiederum nur über eine Lautstärkeerhöhung bemerkbar. Erst von dem  $\Delta t$  ab, bei dem ein Doppeleindruck entsteht, beginnt die Schwelle abzusinken.

Diese so unterschiedlich verlaufenden Schwellen spielen sicherlich eine Rolle, wenn Schallsignale verschiedener Länge aufeinander folgen, wie es etwa bei fortlaufendem Sprachtext oder auch Musik der Fall ist. Als zusammenfassendes Ergebnis dieser Messung läßt sich sagen: je länger ein Primärschall ist, um so höher liegt die aWs für ein folgendes Schallereignis.

In Anlehnung an die Betrachtungen zu den Bildern 3 und 4 wurde der Versuch unternommen, die Kurvenschar aus Bild 5 einheitlich darzustellen. Als Abszisse wurde die Zeit zwischen dem Ende des 10, 50 beziehungsweise 100 ms langen  $S_0$  und dem Ende des jeweiligen  $S_{\Delta t}$  gewählt. Unter Beibehaltung der Ordinatenwerte ergeben sich aber immer noch getrennt liegende Kurven. — Die Verlängerung der Primärimpulse bedingt eine Zunahme des Lautstärkeindrucks. Bild 8 zeigt die Abhängigkeit dieses Lautstärkeindrucks von der Impulslänge. Dementsprechend wurden die Pegelwerte der 10 und 100 ms langen Primärimpulse so verändert, daß sie den gleichen Lautstärkeindruck wie ein 50 ms langer  $S_0$  hervorrufen würden. Werden diese Pegeldifferenzen bei Übertragung der Ordinatenwerte mit berücksichtigt, ergibt sich Bild 6. Alle drei aWs

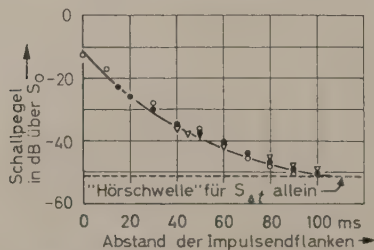


Bild 6. Umzeichnung von Bild 5.

▽ 10 ms langer  $S_0$ , ● 50 ms langer  $S_0$ ,  
○ 100 ms langer  $S_0$ .

liegen jetzt praktisch auf ein und derselben Kurve. Dieses heißt aber, die Nachwirkung eines Schallereignisses ist unabhängig von der Länge des diese Nachwirkung hervorrufenden Schallsignales, sofern nur der von dieser Länge abhängige Lautstärkeindruck berücksichtigt wird.

Ein ähnliches Ergebnis lieferte eine weitere Messung. Bei dieser war die Verzögerung zwischen gleich langem  $S_0$  und  $S_{\Delta t}$  für die ganze Messung konstant ( $= 30$  ms). Beide Schalle fielen aus der 0°-Richtung ein. In Abhängigkeit von der Impulslänge ist nun die aWs für diesen  $S_{30}$  gemessen worden (Bild 7). Die Abbildung enthält außerdem die „Hörschwelle“ eines Einzelimpulses als Funktion seiner Länge. Der Abfall der „Hörschwelle“ oder,

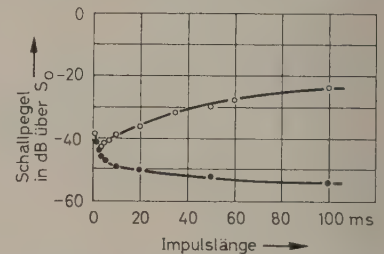


Bild 7. Anstieg der aWs mit der Impulslänge und „Hörschwelle“ für Einzelimpuls.

○ aWs für  $S_{30}$ ,  
● „Hörschwelle“ für Einzelimpuls.

was damit gleichbedeutend ist, der Aufbau der Lautstärke ist bei dem hier benutzten Schallpegel nach etwa 90 bis 100 ms beendet. Dieses Ergebnis stimmt mit den Resultaten anderer Autoren überein [20]. — Dieser Lautstärkeaufbau vollzieht sich nach einem Exponentialgesetz, wie der geradlinige Verlauf dieser Kurve bei Auftragung über einer logarithmisch geteilten Zeitachse zeigt (Bild 8).

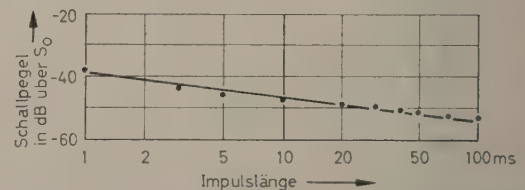


Bild 8. „Hörschwelle“ für Einzelimpuls über logarithmischer Zeitachse.

Der Anstieg der aWs in Bild 7 läßt sich qualitativ deuten mit Hilfe der bereits vorhin erwähnten Unabhängigkeit der Dauer des „Nacheffektes“ eines Schallsignales von seiner Lautstärke. Diese Unabhängigkeit bedingt eine Abhängigkeit der Zeitkonstanten dieses „Nacheffektes“ von der Lautstärke. Je lauter ein Schallereignis empfunden wird, das heißt je länger ein Impuls ist, um so kleiner muß diese Zeitkonstante sein. Für den Fall des hier

untersuchten  $S_{30}$  heißt das aber: je länger ein Primärimpuls ist, je lauter er also empfunden wird, desto höher muß die aWs liegen. Genau dies ergab die Messung.

Eine ganz entsprechende Aussage über den im Vorhergehenden erwähnten Zeitverlauf der aWs erlaubt auch das Ergebnis der folgenden Messung. Die aWs für einen  $S_{\Delta t}$  wurde in Abhängigkeit von der Verzögerung gemessen.  $S_0$  und  $S_{\Delta t}$  waren gleich lang und hatten die Einfallrichtung  $0^\circ$ . Die Impulslänge war Parameter. In Bild 9, das das Ergebnis zeigt, ist die unterschiedliche Lage der Hörschwellen für einen Impuls allein berücksichtigt.

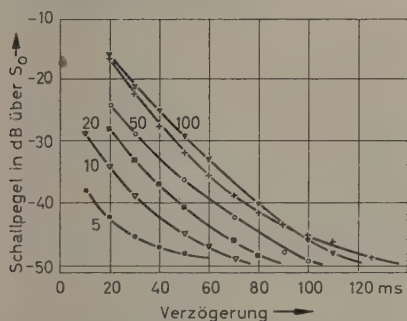


Bild 9. aWs als Funktion der Verzögerung; Parameter: Impulslänge in ms. + Messung mit „zack“.

Erkennbar ist wiederum die Erhöhung der aWs mit der benutzten Impulslänge. Überdies ist zu sehen, daß die „Zeitkonstante“, wie eben bereits erwähnt, mit zunehmender Impulslänge beziehungsweise Lautstärke abnimmt. In Bild 10 sind die aWs über einer logarithmisch geteilten Zeitachse aufgetragen. Die Kurven ergeben hierbei näherungsweise Geraden, deren Neigung mit zunehmender Impulslänge größer wird.

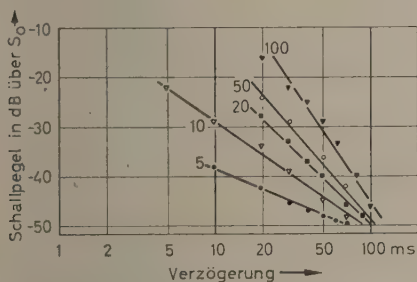


Bild 10. aWs über logarithmischer Zeitskala; Parameter: Impulslänge in ms.

### 3.1.3. Messung des Zeitverlaufes der „Nacherregung“ bei dauernder unterschwelliger Erregung

Bei allen bisherigen Messungen wurde unter jeweils verschiedenen Bedingungen die aWs für einen  $S_{\Delta t}$  gemessen. Eine weitgehende Deutung der Meßergebnisse war möglich mit Hilfe des Begriffes der

„Nacherregung“ nach Beendigung einer Reizeinwirkung. Die derartig gemessenen aWs brauchen nun aber nicht unbedingt identisch zu sein mit dem Zeitverlauf der „Nacherregung“ selbst. Es ist denkbar, daß unterschwellige Erregungen die Nacherregungskurve beeinflussen können.

Ein während des Ablaufes der Nacherregung vorhandener Reiz, der aber in seiner Wahrnehmbarkeit durch diese verdeckt wird, verursacht zum Beispiel eine unterschwellige Erregung. Dieser Fall war bei allen bisherigen Messungen stets gegeben. Es ist nun möglich, daß unterschwellige Erregungen, die erst während des Ablaufes der Nacherregung einsetzen, einen anderen Einfluß zeigen als solche, die vom Beginn des Primärschalles an vorhanden sind.

Um dieses zu prüfen, wurde folgender Versuch unternommen. Als Schallereignis, dessen Nacherregungskurve bei dauernder unterschwelliger Erregung bestimmt werden sollte, wurde ein 120 ms langer Rauschimpuls benutzt. Bei Impulsen dieser Länge ist praktisch bereits der subjektive Lautstärkeaufbau mit der Zeit auf seinem stationären Endwert angelangt. Eine hierdurch bedingte Beeinflussung ist also ausgeschlossen.

Um — im Gegensatz zu allen vorhergehenden Messungen — einen Einfluß der Anfangsflanke des Testschalles zu vermeiden, müßten die Anfangsflanken des Primär- und Testimpulses zusammenfallen, wie in Bild 11 a skizziert. Der Testimpuls wird dann um eine Zeit  $\Delta t$  länger gewählt als der Primärimpuls und in seiner Amplitude so lange variiert, bis die Grenze seiner Wahrnehmbarkeit erreicht ist. Die Messung in dieser Art durchzuführen, war nicht möglich, da so lange Impulse nicht herstellbar waren.

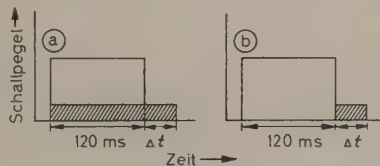


Bild 11. Zur Erklärung der Versuchsanordnung.

Die Messungen erfolgten daher auf die Weise, daß die Anfangsflanke des Testimpulses direkt auf die Endflanke des Primärimpulses gesetzt wurde (Bild 11 b). Bei exakt gleicher Lautstärke der beiden Impulse war die „Stoßstelle“ nicht bemerkbar. Die in Abhängigkeit von  $\Delta t$  gemessene Kurve zeigt Bild 12. Zum Vergleich ist die aWs nach Bild 9 mit eingezeichnet. Die Abweichungen zwischen den beiden Kurven liegen in der Größenordnung von 2 dB, also noch nahezu innerhalb der Fehlerbreite. Im Rahmen der Meßgenauigkeit läßt sich also kein Einfluß einer Änderung einer unterschwelligen Erregung auf den Verlauf der „Nacherregung“

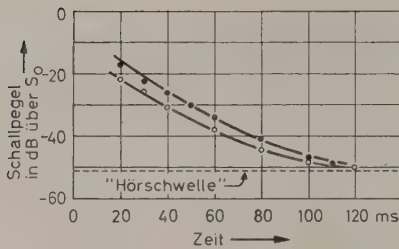


Bild 12. Verlauf der Nacherregungsschwelle.  
○ Zeitverlauf der Nacherregung,  
● aWs, gemessen mit 100 ms langen Impulsen.

feststellen. Eine logarithmische Auftragung der in Bild 12 gezeichneten Nacherregungskurve zeigt Bild 13. Die Kurve verläuft über einen weiten Bereich als Gerade und zeigt andeutungsweise zwei Knicke. Ihrem qualitativen Verlauf nach stimmt sie damit mit einem von STEIN veröffentlichten Ergebnis überein [21]. Auch für die Zeitdauer der Nacherregung ergibt sich annähernd der von STEIN gefundene Wert.

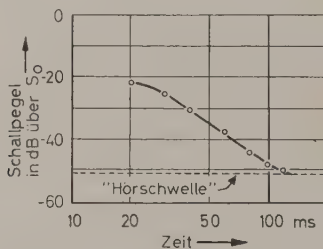


Bild 13. Zeitverlauf der Nacherregung (logarithmisch geteilte Zeitachse).

### 3.1.4. Die Wahrnehmbarkeit gering verzögerter Rückwürfe gleichen Pegels

In der Einleitung wurde als Problem aufgezeigt, unter welchen Bedingungen sich zeitlich auseinanderliegende Rückwürfe zusammenfassen lassen. Für einen Spezialfall soll diese Frage jetzt näher untersucht werden.

Ein Doppelimpuls — bestehend aus zwei völlig gleichartigen Einzelimpulsen — wurde der Versuchsperson im reflexionsfreien Raum mit einer Folgefrequenz von 1 Hz dargeboten. Liegen die beiden Einzelimpulse zeitlich sehr eng benachbart, wird die Versuchsperson nur einen Impuls hören. Haben sie einen großen Abstand, so wird der Doppelimpuls auch einen Doppeleindruck hervorrufen.

Die Aufgabe der Versuchsperson war es nun — durch Variation der Verzögerung des zweiten Impulses — gerade die Zeit  $\Delta t_{gr}$  einzustellen, bei welcher der Eindruck nur eines Impulses „aufsplitterte“ zu einem Doppeleindruck, beziehungsweise der Doppeleindruck „verschmolz“ zu einem einheitlichen Eindruck. Es wurde also nicht in einem Sukzessiv-

verfahren gemessen, sondern mit einem Herstellungsverfahren. Andere Kriterien als die eben erwähnten sollten nicht berücksichtigt werden.

Bei einem ersten Versuch fielen beide Impulse von vorn ein. Die Zeit  $\Delta t_{gr}$ , bei der dieser Doppeleindruck gerade eben wahrnehmbar wird, ist in Bild 14 als Funktion der Impulslänge aufgetragen.

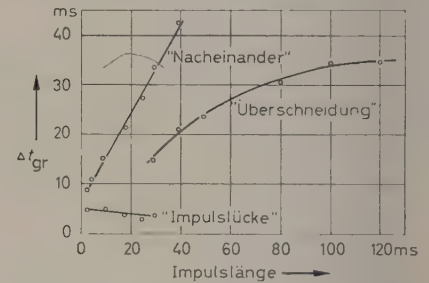


Bild 14. Zur Wahrnehmbarkeit von Doppelimpulsen (bei Richtungsgleichheit).

Für Impulslängen bis etwa 30 ms liegen die  $\Delta t_{gr}$  auf einer Geraden. Diese ist so geneigt, daß die Zeit zwischen Endflanke des ersten und Anfangsflanke des zweiten Impulses (Impulslücke) sich als konstant zu etwa 4 bis 5 ms ergibt; die beiden Impulse liegen „nacheinander“ (Bild 15 a). Diese Zeit muß also überschritten werden, damit unter den hier gegebenen Bedingungen zwei zeitlich getrennte Schallereignisse auch als getrennt wahrgenommen werden können. Mit anderen Worten: zwei gleichlange und gleichlaute Schallereignisse, deren Zeitverzögerung kleiner als 5 ms ist, lassen sich hinsichtlich dieser subjektiven Wirkung durch eines ersetzen, sofern Richtungsgleichheit vorhanden ist [22].

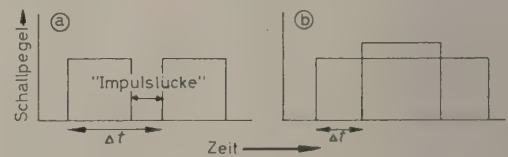


Bild 15. „Nacheinander“ (a) und „Überschneidung“ (b) bei Doppelimpulsen.

Bei größeren Impulslängen ergibt sich etwas anderes. Der Doppeleindruck tritt nicht erst bei einem  $\Delta t_{gr}$  auf, welches einer Impulslücke von 4 bis 5 ms entspricht, sondern bereits früher, offenkundig bedingt durch die teilweise Überlagerung beziehungsweise Überschneidung der beiden Impulse. Er ist qualitativ sehr wohl von dem zu unterscheiden, der sich aus dem Nacheinander der Impulse ergibt. Dieser Eindruck tritt mit zunehmender Impulslänge immer mehr hinter den Überschneidungseffekt zurück. Bei „Überschneidung“ der Impulse werden dem Ohr zwei Anfangs- und zwei Endflanken an-

geboten: Beginn und Ende des Gesamtimpulses sowie Beginn und Ende des um 3 dB in der Amplitude höheren, durch die Überlagerung entstandenen Impulses (Bild 15 b). Die subjektiv empfundene Lautstärke baut sich nun auf, beginnend am Anfang des Gesamtimpulses. Der 3 dB-Sprung in Richtung größerer Amplitude wird nicht wahrgenommen, denn sonst müßte das  $\Delta t_{gr}$  unabhängig von der Impulslänge sein. Es steigt aber mit dieser beziehungsweise mit der mit ihr zusammenhängenden Lautstärke an. Als Doppeleindruck bemerkt wird offenkundig der 3 dB-Abfall in der Amplitude, sobald die Zeit zwischen diesem Abfall und dem Gesamtende des Impulses das  $\Delta t_{gr}$  überschreitet. Diese Zeit muß laut Bild 14 um so größer sein, je länger die Impulse sind, je weiter also der Lautstärkeaufbau fortgeschritten ist. Bei Erreichen einer bestimmten Impulslänge hat aber die subjektiv empfundene Lautstärke ihren stationären Endwert an diesem 3 dB-Abfall erreicht. Eine weitere Verlängerung der Impulse kann die Lautstärke nicht mehr erhöhen. Es ist denkbar, daß dies die Ursache ist für den hier maximal erreichbaren Wert von  $\Delta t_{gr}$ . Nach Bild 14 erreicht das  $\Delta t_{gr}$  seinen Maximalwert bei Impulslängen von etwa 120 ms. Aus Impulslänge minus  $\Delta t_{gr} = 90$  ms müßte sich also die Zeit ergeben, nach welcher der Lautstärkeaufbau beendet ist. Dieser Wert liegt in der Größenordnung der eigenen Messungen (Bild 7) sowie der aus der Literatur bekannten [20].

Ein Vergleich dieses Ergebnisses mit den vorhergehenden aWs-Messungen ist nicht möglich. Die Kriterien, die benutzt wurden, sind völlig verschiedene. Jene Ergebnisse wurden im Sukzessivvergleich gewonnen und ergaben sich aus der Beantwortung der Frage „ist irgendein Unterschied hörbar oder nicht?“. Ob der zu hörende Unterschied auf Lautstärkeverschiedenheiten oder einem zeitlichen Nacheinander beruhte, spielte gar keine Rolle. Bei diesen Versuchen wurde dagegen einerseits das klassische Herstellungsverfahren verwendet und andererseits nur ein ganz spezielles Kriterium zur Beurteilung zugelassen, nämlich nur das „Auftreten eines Doppeleindrucks“.

Um zu erfahren, wie weit dieser „Verdeckungseffekt“ von der Einfallsrichtung der beiden Schallsignale abhängt, wurde derselbe Versuch noch einmal in abgeänderter Form durchgeführt. Zwei Lautsprecher strahlten wiederum zwei breitbandige Rauschimpulse ab (gleich lang, gleiche Amplitude). Die Einfallsrichtungen waren jetzt aber  $40^\circ$  links beziehungsweise  $40^\circ$  rechts (Bild 16). Die Fragestellung blieb die gleiche. Bei der Verzögerungszeit  $\Delta t = 0$  ms zwischen den beiden Impulsen ortet man eine Phantomschallquelle in Blickrichtung. Ein langsames Anwachsen von  $\Delta t$  bewirkt ein Wandern der

scheinbaren Schallquelle in Richtung auf den Lautsprecher, welcher den ersten Impuls abgestrahlt hat. Der von dem zweiten Lautsprecher ankommende spätere Impuls ist für sich zunächst nicht wahrnehmbar, sondern erhöht lediglich die Lautstärke des

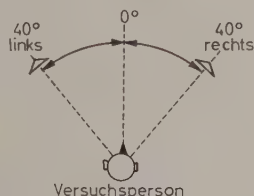


Bild 16. Lautsprecheranordnung.

ersten [9]. Gemessen wird wieder die Verzögerung  $\Delta t_{gr}$ , bei welcher der zweite Impuls als zusätzliches Schallereignis wahrnehmbar wird. Bild 17 zeigt, daß dieses  $\Delta t_{gr}$ , genau wie in Bild 16, einem Grenzwert zustrebt. Der hier maximal erreichbare Wert liegt aber in der Größenordnung von nur 9 ms und wird bereits bei Impulslängen von etwa 30 ms erreicht, das heißt die unter der Bedingung der Richtungsungleichheit erreichbare Verdeckung ist also eine wesentlich geringere als bei Einfall der beiden Schalle aus gleicher Richtung. Bei der Frage nach der Zusammenlegbarkeit zeitlich auseinanderliegender Rückwürfe muß demnach der Einfluß der Einfallsrichtung bekannt sein und berücksichtigt werden. Dieses spezielle Phänomen wird im nächsten Abschnitt dieser Arbeit ausführlich behandelt werden.

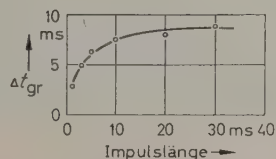


Bild 17. Zur Wahrnehmbarkeit von Doppelimpulsen (bei Richtungsungleichheit).

Die stärkere Verdeckung bei Richtungsgleichheit gegenüber derjenigen bei Richtungsungleichheit könnte ihre Ursache in einer stärkeren Hemmung der nervösen Elemente, die für eine Wahrnehmung erregt werden müssen, haben. — Auffällig ist hier (Bild 17), also bei Richtungsungleichheit, daß das  $\Delta t_{gr}$  mit wachsender Impulslänge nicht so lange ansteigt, bis der von der Impulslänge abhängige Lautstärkeaufbau seinen stationären Wert erreicht hat, wie es bei der vorhergehenden Messung (Bild 16) der Fall war. Man muß annehmen, daß die durch die primäre Erregung bedingte Hemmung für die Wahrnehmbarkeit eines aus einer anderen Richtung einfallenden Signales bereits maximal ist, bevor die Primärerregung ihren Endwert erreicht hat.

### 3.1.5. Die aWs als Funktion der Verzögerung, gemessen mit einem Sprachsignal

Nachdem in allen bisherigen Untersuchungen nur Rauschimpulse verwendet wurden, sollte in einer weiteren Messung geklärt werden, welche Ergebnisse mit einem Sprachsignal erhalten werden.

Um ein definiertes und reproduzierbares Motiv zu haben, wurde nicht fortlaufender Sprachtext benutzt, sondern nur ein einziges einsilbiges Wort gewählt, nämlich „zack“. Dieses wurde im reflexionsfreien Raum auf Tonband aufgenommen. Aus der Bandaufnahme wurde eine endlose Schleife solcher Länge hergestellt, daß sich bei ihrer fortwährenden Wiedergabe eine Wiederholungsfrequenz von 1,4 Hz, das sind 0,7 s von Wiederholung zu Wiederholung, ergab. Unter Berücksichtigung der bisherigen Ergebnisse scheint diese Zeit dafür auszureichen, daß bei erneutem Eintreffen eines Primärschalles und seiner Verzögerung alle Nachwirkungen der vorhergehenden Schallsignale abgeklungen sind.

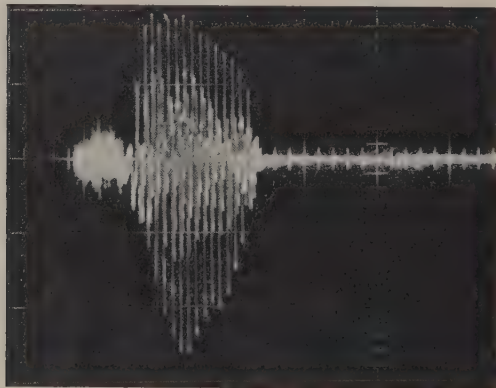


Bild 18. Oszillogramm des Wortes „zack“.

Bild 18 zeigt das Oszillogramm des Wortes „zack“. Die drei verschiedenen Laute, die dieses Wort bilden, — z — a — k —, sind deutlich zu erkennen. Der Zischlaut — z — am Anfang des Wortes hat eine Länge von etwa 65 ms, der Vokal — a —, der die größte Energie enthält, hat eine Lautdauer von etwa 90 bis 100 ms. Bei der hier benutzten Sprechweise tritt der nach einer Pause von ungefähr 120 ms entstehende Explosivlaut — k — kaum noch in Erscheinung.

Der Primärschall und der verzögerte Schall fallen beide aus der 0°-Richtung ein (Bild 19 a). Der  $S_0$  hat den gleichen Pegel wie bei den vorhergehenden Messungen. Das Ergebnis dieser Messung zeigt die Kurve a in Bild 20. Da der energetisch wirksame Bestandteil des Wortes „zack“ eine Länge von etwa 100 ms hat, erscheint es sinnvoll, dieses Ergebnis

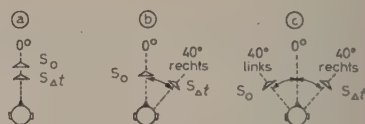


Bild 19. Lautsprecheranordnung.

mit dem zu vergleichen, welches mit Rauschimpulsen gleicher Länge gewonnen wurde. Diese Kurve ist ebenfalls in Bild 20 eingezeichnet. Die beiden Kurven stimmen, wie zu erwarten war, annähernd überein. Eine mögliche Ursache für die Abweichungen voneinander könnte in der unterschiedlichen spektralen Energieverteilung bei den beiden Testschällen liegen. Sehr groß scheint ein solcher Einfluß aber nicht zu sein.

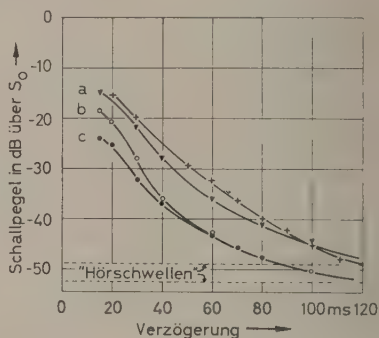


Bild 20. aWs für verschiedene Einfallsrichtungen. Die Kurven a, b und c entsprechen den in Bild 19 angegebenen Lautsprecheranordnungen. + 100 ms lange Rauschimpulse.

### 3.2. Messungen bei Richtungsungleichheit von Primärschall und gegenüber diesem verzögerten Schallsignal

Bei den vorhergehenden Untersuchungen fielen der Primärschall und der verzögerte Testschall stets aus ein und derselben Richtung ein, nämlich von vorn. Von wesentlichem Interesse ist nun auch der Fall der Richtungsungleichheit, der in natürlichen Schallfeldern stets vorhanden ist.

#### 3.2.1. Die aWs als Funktion der Verzögerung mit der Einfallsrichtung als Parameter

Benutzt wird wiederum das Testwort „zack“. Bild 20 zeigt auch diese Ergebnisse. Im Fall der Kurve b fallen der  $S_0$  von 0° und der  $S_{\Delta t}$  von 40° rechts ein (Bild 19 b), bei Kurve c fallen der  $S_0$  von 40° links und der  $S_{\Delta t}$  von 40° rechts ein (Bild 19 c). Variiert wurde die Verzögerung  $\Delta t$ .

Es ergibt sich, daß bei auseinanderliegenden Einfallsrichtungen von  $S_0$  und  $S_{\Delta t}$  die aWs tiefer liegt als bei zusammenfallenden Einfallsrichtungen der

beiden Schallsignale. Die unterschiedlichen Empfindlichkeiten des Gehörs für einen Schalleinfall von vorn beziehungsweise von  $40^\circ$  rechts oder links zeigen sich in der verschiedenen Lage der Hörschwellen. Diese Richtungsabhängigkeit der Ohrempfindlichkeit — bei den hier benutzten Richtungen beträgt sie 3 bis 4 dB — kann allein aber die bis zu 8 dB unterschiedlichen Lagen der aWs sicherlich nicht erklären. Im Fall b kommen Richtungen vor, die lautstärkemäßig unterschiedlich bewertet werden, und die aWs ist auch in der dementsprechenden Richtung verschoben. Im Fall c wurden aber Schalleinfallrichtungen benutzt, die in bezug auf die Lautstärkeempfindung gleichwertig sind, aber gerade hier treten noch größere Verschiebungen der aWs auf.

Für die leichtere Erkennbarkeit eines verzögerten Schallsignales bei Einfall aus einer seitlichen Richtung sind vielleicht also mehrere Ursachen vorhanden, einerseits die größere Empfindlichkeit des Gehörs bei seitlichem Schalleinfall und andererseits ein vermuteter nervöser Kopplungsmechanismus, der eine Schwellenniedrigung bedingt. Dieser könnte identisch sein mit demjenigen, der im Zusammenhang mit den Ergebnissen in Bild 17 angedeutet wurde.

### 3.2.2. Die aWs als Funktion der Einfallrichtung bei fester Verzögerung

Die Richtungsabhängigkeit für den Verlauf der aWs soll jetzt näher untersucht werden. Als Motiv wurde wieder das Wort „zack“ benutzt. Der Primärschall fiel aus der  $0^\circ$ -Richtung ein. Als Schalleinfallrichtungen für einen  $S_{50}$  waren  $10^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $50^\circ$ , ...,  $150^\circ$ ,  $170^\circ$  und  $180^\circ$  möglich (Bild 21).

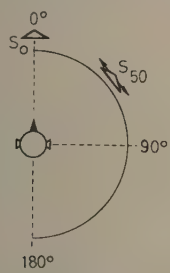


Bild 21. Lautsprecheranordnung. Einfallrichtung des  $S_{50}$  wird variiert.

Das Ergebnis zeigt die entsprechende Kurve in Bild 22. Der Schallpegel des  $S_0$  betrug 55 dB über  $2 \cdot 10^{-4}$  dyn/cm<sup>2</sup>.

In bezug auf den Einfall des  $S_{50}$  aus der  $0^\circ$ -Richtung fällt die aWs für zunehmendes Auseinanderücken der beiden Schallquellen ab. Zwischen  $30^\circ$  und  $70^\circ$  hat sie ein Minimum und steigt dann lang-

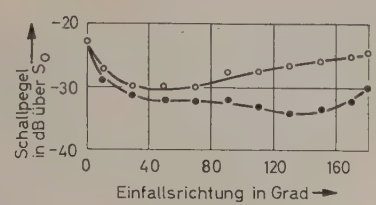


Bild 22. Richtungsabhängigkeit der aWs.

- $S_0$  von  $0^\circ$ ,  $S_{50}$  variabel;
- $S_0$  variabel,  $S_{50}$  von  $0^\circ$ .

sam wieder an bis zu Winkeln, die einem rückwärtigen Schalleinfall entsprechen. Aber auch hier liegt die aWs noch um etwa 2 dB tiefer als bei  $0^\circ$ -Einfall. Die maximale Absenkung gegenüber diesem beträgt etwa 7 dB. Diese Messung liefert also praktisch auch das Ergebnis der vorigen (Bild 20, Kurven a und b).

Es ergibt sich also, daß die aWs für einen  $S_{50}$  und für Einfallrichtungen zwischen  $20^\circ$  und  $80^\circ$  ein breites Minimum hat, das heißt, daß aus diesen Richtungen einfallende Rückwürfe am leichtesten erkennbar sind, sofern der Primärschall von vorne einfällt.

Um eine genauere Aussage über den Einfluß der Lautstärkeempfindung in ihrer Abhängigkeit von der Schalleinfallrichtung machen zu können, wurde die Richtempfindlichkeit des Gehörs im Falle des beidohrigen Hörens gemessen. Als Schalleinfallrichtungen wurden die des  $S_{50}$  im vorigen Versuch benutzt. Für jede Einfallrichtung wurde im Sukzessivvergleich auf Lautstärkegleichheit mit einem von vorn einfallenden Schall eingestellt. Als Testgeräusch wurde oktavbreites weißes Rauschen verschiedener Mittenfrequenz gewählt. In Bild 23 ist als Abszisse die Schalleinfallrichtung aufgetragen. Die Ordinate gibt an, um wieviel dB lauter beziehungsweise leiser der aus der betreffenden Richtung einfallende Schall gehört wird im Vergleich zu einem von vorn einfallenden gleichen Pegels. Das Ergebnis deckt sich mit ähnlichen aus der Literatur bekannten Untersuchungen [23]. Die Richtung maximaler Empfindlichkeit liegt je nach der Frequenz im Winkelbereich zwischen  $30^\circ$  und  $70^\circ$ , also in demselben Winkelbereich, in dem die aWs ihr Minimum hat.

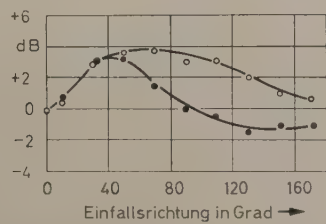


Bild 23. Richtungsempfindlichkeit des Gehörs.

- 0,8 ... 1,6 kHz,
- 3,2 ... 6,4 kHz.

Ein aufschlußreiches Ergebnis liefert der nächste Versuch. In diesem wurden die in Bild 21 gezeigten Einfallrichtungen des  $S_0$  und des  $S_{50}$  gegeneinander ausgetauscht, das heißt jetzt wurde die Einfallrichtung des  $S_{50}$  konstant auf  $0^\circ$  festgehalten, und die Einfallrichtungen des  $S_0$  wurden in oben beschriebener Weise umgeschaltet. Das Ergebnis ist gleichfalls in Bild 22 dargestellt.

Die Werte, die unter diesen Bedingungen für die aWs des  $S_{50}$  gewonnen wurden, liegen durchweg tiefer gegenüber denen im vorhergehenden Fall. Liegen sie für Einfallswinkel bis zu  $70^\circ$  noch etwa in derselben Größenordnung, so unterscheiden sie sich für weiter rückwärtige Richtungen erheblich voneinander, und zwar bis zu 8 dB. Die Schwellerniedrigung gegenüber richtungsgleichem Einfall der beiden Schalle beträgt für diesen Winkelbereich mehr als 10 dB.

Unter Hinzunahme dieses Ergebnisses läßt sich nun die Absenkung der aWs des  $S_{50}$  — bei  $S_0$ -Einfall von vorn — nicht durch die Richtungsabhängigkeit des Gehörs erklären. Nämlich man dieses an, so könnte man zwar sehr wohl den Schluß ziehen, daß die aWs bei seitlichem Einfall des  $S_{50}$  tiefer liegen muß als bei einem Einfall des  $S_{50}$  vor vorne, weil eben das Gehör für seitliche Einfallrichtungen empfindlicher ist. Diese Schlußweise führt aber zu einem Widerspruch mit dem Experimentalfund; denn tauscht man die Einfallrichtungen der beiden Schallsignale aus, läßt also jetzt den  $S_{50}$  von vorn einfallen und den  $S_0$  von der Seite, so ist es nun dieser, der auf Grund der Richtcharakteristik des Gehörs als der lautere empfunden wird. Dieses müßte dann aber heißen, daß der darauf folgende  $S_{50}$  leichter verdeckt werden kann, daß also seine aWs höher läge. Wie die Untersuchung jedoch ergibt, liegt diese eher noch etwas tiefer.

Die Ursache für diesen Effekt kann also nur bei irgendeinem anderen Vorgang im nervösen Teil des Gehörs liegen. Mit dem Begriff des „Nacheffektes“, durch den die Wiedererregbarkeit nervöser Elemente behindert wird, war eine qualitative Deutung der bisherigen Ergebnisse möglich. Da dort Richtungs-gleichheit vorhanden war, spielten sich die Erregungsvorgänge quasi „einkanalig“ ab. Kommen nun aber verschiedene Richtungen ins Spiel, werden sie „mehrkanalig“ ablaufen. Man muß annehmen, daß die zu den verschiedenen Richtungen gehörigen Erregungen irgendwie verkoppelt sind. Ein aus einer bestimmten Richtung zuerst einfallender Schall hemmt offenkundig die zu einem zweiten Schall gehörige Erregungsbildung um so mehr, je näher die beiden Einfallrichtungen zusammenliegen.

Auf Grund der Ergebnisse (Bild 22) muß man nun weiter den Schluß ziehen, daß die Stärke dieser Hemmung nicht nur von der Winkeldifferenz der

beiden Schalleinfallrichtungen abhängt, sondern zusätzlich noch von der Richtung des zuerst ankommenden Schallsignales, das den Hemmechanismus auslöst; denn ein von der Seite einfallender  $S_0$  verdeckt einen von vorn einfallenden  $S_{50}$  weniger als ein von vorn einfallender  $S_0$  einen von der Seite einfallenden  $S_{50}$ . Die in diesem Fall ausgelösten Erregungen könnten eine verstärkte Hemmung hervorrufen, weil der Reiz auf beide Ohren zur gleichen Zeit mit gleicher Phase und mit gleicher Amplitude einwirkt.

### 3.2.3. Frequenzabhängigkeit der aWs bei Richtungsgleichheit

In der Beschreibung der zu Bild 20 gehörigen Messung wird vermutet, daß die aWs in erster Näherung von der Frequenz unabhängig ist. Sowohl in jenen als auch in allen anderen Messungen hatten  $S_0$  und  $S_{\Delta t}$  stets das gleiche Spektrum. Im Vorhergehenden war gezeigt, daß bei Richtungsgleichheit der beiden Schalle maximale Verdeckung des verzögerten Schallsignales auftritt. Es ist nun zu erwarten, daß bei spektraler Gleichheit der beiden Schallsignale gleichfalls eine maximale Verdeckung zu beobachten ist.

Der Versuch wurde nun nicht in der Art durchgeführt, daß aus dem  $S_0$  und dem benutzten  $S_{50}$  verschiedene Spektralgebiete ausgefiltert wurden. Die aWs für den  $S_{50}$  wurde vielmehr unter dem zusätzlichen Einfluß oktavbreiten weißen Rauschens gemessen, dessen Einfallrichtungen in der bereits beschriebenen Art zwischen  $0^\circ$  und  $180^\circ$  wählbar waren. Das verwendete Motiv, wiederum das Wort „zack“, wurde breitbandig abgestrahlt. Die Einfallrichtungen von  $S_0$  und  $S_{50}$  wurden während der ganzen Messung konstant auf  $0^\circ$  beziehungsweise  $40^\circ$  rechts festgehalten. Das Ergebnis ist in Bild 24 dargestellt.

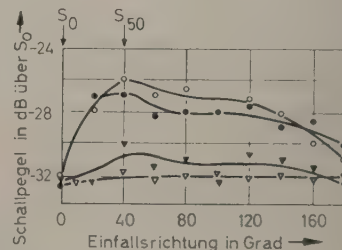


Bild 24. Der Einfluß der verdeckenden Wirkung von Rauschen auf die aWs.

- ▼ 0,3 ... 0,6 kHz,
  - 0,6 ... 1,2 kHz,
  - 1,2 ... 2,4 kHz,
  - ▽ 4,8 ... 9,6 kHz.
- Bandbreite des weißen Rauschens.

Maximale Verdeckung beziehungsweise Erhöhung der aWs erhält man bei Übereinstimmung der Einfallrichtungen von verdeckendem und verdecktem

Schall, wie auch auf Grund der vorhergehenden Überlegungen erwartet wurde. Diese Erhöhung der aWs tritt aber lediglich bei den Rauschoktaven 0,6 bis 1,2 kHz und 1,2 bis 2,4 kHz auf. Höher (4,8 bis 9,6 kHz) beziehungsweise tiefer (0,3 bis 0,6 kHz) liegendes Rauschen zeigt einerseits praktisch keine Richtungsabhängigkeit in der Verdeckung, andererseits eine allgemein geringere Verdeckung. Zur Erklärung dieses Frequenzeinflusses zeigt Bild 25 die Frequenzanalyse des benutzten Wortes „zack“. Diese wurde mit einem Hochttonanalysator gewonnen. Die Analysiergeschwindigkeit war derart, daß von Wiederholung zu Wiederholung des Testwortes die Mittenfrequenz des Analysators um etwa 6 Hz weitergeschoben wurde. Die gesamte Analysierzeit betrug etwa 25 Minuten. Der Hauptenergieanteil des Wortes „zack“ liegt im Bereich von 0,9 bis 1,3 kHz. Rauschen aus dem gleichen Frequenzbereich ist nun auch in der Lage, größtmögliche Verdeckung hervorzurufen.

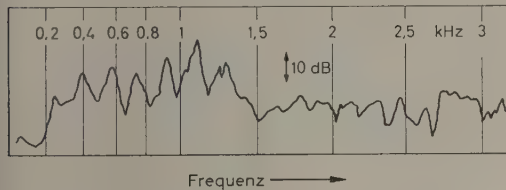


Bild 25. Frequenzanalyse des Wortes „zack“.

Ein Schallereignis läßt sich also um so besser verdecken, je besser der verdeckende Schall sowohl in seiner Einfallsrichtung als auch in seiner spektralen Energieverteilung mit jenem übereinstimmt; also auch bei spektraler Gleichheit wird die eine Wahrnehmung behindernde Hemmung maximal sein.

### 3.3. Verlauf der aWs bei zusätzlicher Anwesenheit eines zweiten Rückwurfes

In einem letzten Abschnitt soll der Verlauf der aWs eines verzögerten Schallsignales untersucht werden, wenn zusätzlich ein zweiter Rückwurf vorhanden ist. Die Versuche wurden wieder mit Rauschimpulsen ausgeführt. Diese hatten generell eine Länge von 50 ms und wurden mit einer Folgefrequenz von 1 Hz abgestrahlt.

#### 3.3.1. Die aWs als Funktion der Verzögerung bei festen Einfallsrichtungen der drei beteiligten Schallsignale

In einer ersten Versuchsreihe wurden die Einfallsrichtungen konstant gehalten. Der  $S_0$  fiel von vorn ein, die beiden Rückwürfe von  $40^\circ$  rechts (Bild 26). Gemessen wurde die aWs des einen Rückwurfes als

Funktion seiner Verzögerung. Dieser Rückwurf werde als Test- $S_{\Delta t}$  bezeichnet. Die Verzögerung des anderen Impulses wurde als Parameter gewählt und

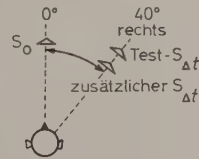


Bild 26. Lautsprecheranordnung.

betrug 20, 40, 60, 80 und 100 ms, seine Amplitude entsprach der des  $S_0$ . Das Ergebnis dieser Messung ist in Bild 27 aufgetragen. Zum Vergleich enthält diese Abbildung auch die aWs eines  $S_{\Delta t}$  bei Abwesenheit eines zweiten zusätzlichen Rückwurfes.

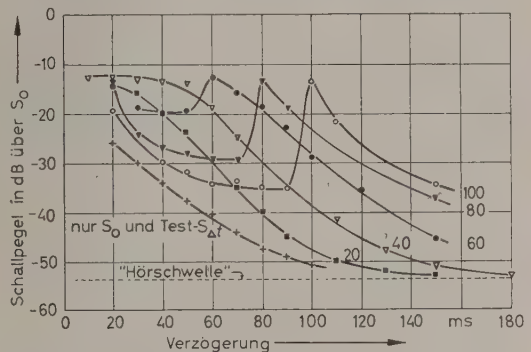


Bild 27. aWs als Funktion der Zeit; Parameter: Verzögerung des zusätzlichen  $S_{\Delta t}$  in ms.

Innerhalb der sich ergebenden Kurvenschar ist dies die tiefstliegende Schwellkurve. Ein zusätzlicher Rückwurf bewirkt nun für den auf ihn folgenden Testrückwurf eine Schwellerhöhung. Nimmt die Verzögerung des Zusatzrückwurfes zu, wird die aWs in Richtung größerer Zeiten verschoben. Der zusätzliche Rückwurf übernimmt also quasi die Rolle des Primärschalles und bestimmt den weiteren Verlauf der aWs. — Für kleine Verzögerungen des Einschubes, etwa 20 oder 40 ms, und bei kleinen Verzögerungen des Testrückwurfes beginnen die aWs mit einem näherungsweise waagerechten Verlauf. Die aWs liegen in beiden Fällen in der Größenordnung von  $-12$  dB, wieder bedingt durch die Erkennbarkeitsgrenze von Lautstärkeänderungen. Da bis zu Verzögerungen von 20 beziehungsweise 40 ms eine getrennte Wahrnehmung des Testschalles nicht möglich ist, beginnen die aWs erst bei etwas größeren Zeiten abzusinken (vergleiche hierzu auch Bild 5). — Liegt der Zusatzrückwurf später — bei 60, 80 oder 100 ms — so ist bei kleinen Verzögerungen des Test- $S_{\Delta t}$  nur der Nacheffekt des  $S_0$  wirksam. Die aWs fallen dementsprechend ab. Auffallend ist, daß

dieser Abfall schwächer ist als bei Abwesenheit des zusätzlichen  $S_{\Delta t}$ . Bei Annäherung der Verzögerung des Testrückwurfes an die des zweiten Rückwurfes vergrößert sich diese Abweichung. Die aWs nähern sich einem waagerechten Verlauf. Hierin zeigt sich ein Einfluß des folgenden Zusatzrückwurfes, denn die Erklärung, daß ein als Rückwurf auf einen Primärimpuls folgender Impuls dann „erkannt“ wird, wenn der Beginn seiner Endflanke die Nacherregungskurve des vorangehenden Impulses erreicht oder überschreitet, ist hier nicht möglich. Das Ende des Testimpulses fällt ja bereits in den folgenden zusätzlichen Impuls. Decken beide Impulse sich völlig, muß die aWs sehr stark ansteigen, da ein Erkennen des Testimpulses in diesem Falle nur über Lautstärkeunterschiede möglich ist.

Die aWs für einen Rückwurf wird also erhöht, wenn zwischen dem Testrückwurf und dem Primärschall ein weiterer Rückwurf eingeschoben wird. Der Betrag dieser Schwellenerhöhung hängt von dessen Verzögerung und sicherlich auch von seiner Amplitude ab. Eine Schwellenerhöhung kann gleichfalls eintreten, wenn auf den Testrückwurf noch ein weiterer Rückwurf folgt.

### 3.3.2. Die aWs als Funktion der Einfallsrichtung bei festen Verzögerungen der drei beteiligten Schallsignale

Wie weit in dieses Ergebnis noch Richtungsabhängigkeiten eingehen, wurde im letzten Versuch geprüft.

Die Einfallsrichtung des  $S_0$  wurde konstant auf  $0^\circ$  gehalten (Bild 28). Die aWs eines um 30, 70, 90 und 150 ms gegenüber diesem verzögerten und aus einer festen Richtung von  $40^\circ$  rechts einfallenden Testimpulses wurde gemessen, und zwar als Funktion der Einfallsrichtung ( $0$  bis  $180^\circ$ ) eines um 80 ms gegenüber dem  $S_0$  verzögerten zusätzlichen Impulses. Dieser hatte wieder die gleiche Amplitude wie der  $S_0$ .

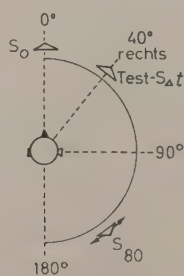


Bild 28. Lautsprecheranordnung. Einfallsrichtung des zusätzlichen  $S_{80}$  wird variiert.

Aus Bild 29 ergibt sich übereinstimmend für alle Verzögerungen des Testimpulses, daß die aWs ein

Maximum besitzt, wenn die Einfallsrichtungen von Testimpuls und Zusatzimpuls zusammenfallen. — Für einen  $S_{90}$  verläuft dieses Maximum sehr flach und liegt bei hohen Pegelwerten. Die Erkennung des Testimpulses ist im wesentlichen wieder nur über Lautstärkeunterschiede möglich. Das Auftreten einer Phantomschallquelle für Einfallsrichtungen des zusätzlichen Rückwurfes zwischen  $20^\circ$  und  $130^\circ$  wird zur Verbreiterung dieses Maximums beitragen.

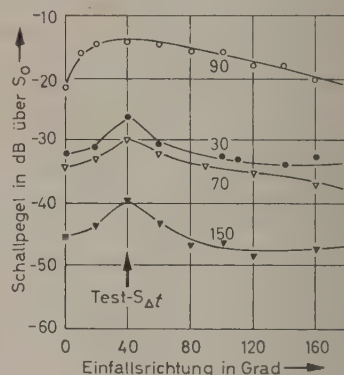


Bild 29. Richtungsabhängigkeit der aWs bei Anwesenheit eines zusätzlichen Rückwurfes. Parameter: Verzögerung des Test- $S_{\Delta t}$  in ms.

Das Auftreten dieser Maxima weist auf die Ergebnisse hin, die im vorigen Abschnitt in Bild 22 dargestellt wurden. War dort der  $S_0$  bei Richtungs-gleichheit der verdeckende Schall, so ist es hier der entweder vor oder nach dem Testschall liegende zusätzliche Rückwurf. Der Einfluß des  $S_0$  tritt bezüglich der Richtungsabhängigkeit gar nicht mehr in Erscheinung. Für weit auseinanderliegende Richtungen ( $40^\circ$  und  $180^\circ$ ) beträgt der Unterschied in der aWs hier etwa 7 bis 9 dB, liegt also in derselben Größenordnung wie bei eben erwähnter Messung.

Es interessiert nun ein Vergleich dieses Ergebnisses (Bild 29) mit dem vorhergehenden (Bild 27). Ein solcher ist möglich, wenn man die Darstellung derart umzeichnet, daß als Parameter statt der Verzögerung des Testimpulses die Einfallsrichtung des zusätzlichen  $S_{80}$  auftritt. Wenn auch die Zahl der Kurvenpunkte, die man bei dieser Art der Auftragung erhält (Bild 30), recht gering ist, so ergibt sich doch derselbe Gang im Verlauf der aWs wie in Bild 27. Zusätzlich liefert diese Darstellung noch das Ergebnis, daß der qualitative Verlauf der aWs unabhängig ist von der Einfallsrichtung des Zusatzrückwurfes. Lediglich die Stärke seiner verdeckenden Wirkung hängt von seiner Einfallsrichtung ab.

Im Prinzip lieferten die Messungen mit mehreren Rückwürfen keine generell neuen Ergebnisse gegenüber denen, die mit einem Rückwurf gewonnen wurden.

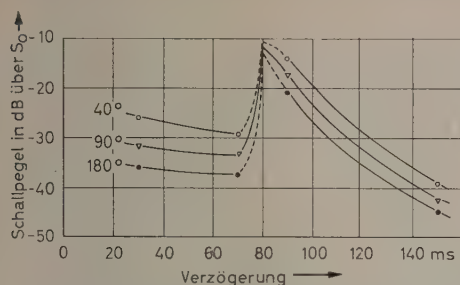


Bild 30. Umzeichnung von Bild 29. Parameter: Einfallsrichtung des zusätzlichen  $S_{80}$ .

#### 4. Schlußbetrachtung

In vorliegender Arbeit wurde an Hand einer Reihe einfacher Schallfeldkonstellationen gezeigt, in welchem Maße ihre einzelnen Bestimmungsgrößen — Schallpegel, Verzögerung, Schalleinfallsrichtung, spektrale Energieverteilung — zu einer bestimmten subjektiven Wirkung beitragen.

Mit diesen Ergebnissen sollte es möglich sein, auf den Verlauf der aWs bei Anwesenheit noch weiterer Rückwürfe, als hier behandelt wurden, zu schließen. Traten doch bei den Messungen mit nur einem zusätzlichen Rückwurf in entsprechender Form dieselben Effekte auf, wie sie in dem einfachsten Fall — Primärschall und Testrückwurf — gemessen waren.

Für weiterführende Untersuchungen wird nun unter anderem eine Beziehung benötigt zwischen dem hier benutzten Kriterium für die subjektive Wirkung einfacher Schallfelder einerseits und einem solchen für die Beurteilung natürlicher Schallfelder andererseits. Damit und unter Berücksichtigung bereits bekannter Arbeiten sollte es möglich sein, wirkliche Schallfelder nachzubilden und auf ihre subjektiven Wirkungen hin zu beurteilen.

Herrn Prof. Dr. Dr. E. H. E. MEYER danke ich für die Anregung zu dieser Arbeit sowie für sein stets

förderndes Interesse und zahlreiche wertvolle Ratschläge. — Der Deutschen Forschungsgemeinschaft habe ich für zur Verfügung gestellte Sachmittel zu danken.

(Eingegangen am 4. Januar 1961.)

#### Schrifttum

- [1] THIELE, R., *Acustica* **3** [1953], 291.
- [2] MEYER, E., *J. Acoust. Soc. Amer.* **26** [1954], 630.
- [3] MEYER, E. und THIELE, R., *Acustica* **6** [1956], 425.
- [4] SCHODDER, G. R., *Acustica* **6** [1956], 445.
- [5] MEYER, E. und BURGTORF, W., *Acustica* **7** [1957], 313.
- [6] JUNIUS, W., *Acustica* **9** [1959], 289.
- [7] BOUTROS, R., Dissert. T. H. Karlsruhe 1956.
- [8] SCHIRMER, R., bislang unveröffentlichte Untersuchungen an der T. H. Dresden.
- [9] HAAS, H., *Acustica* **1** [1951], 49.
- [10] MEYER, E. und SCHODDER, G. R., *Nachr. Ak. Wiss.*, No. 6, Göttingen 1952.
- [11] NICKSON, A. F. B. und MUNCEY, R. W., *Acustica* **9** [1959], 316.
- [12] LOCHNER, J. P. A. und BURGER, J. F., *Acustica* **8** [1958], 1.
- [13] LOCHNER, J. P. A. und DE V. KEET, W., *J. Acoust. Soc. Amer.* **32** [1960], 393.
- [14] BURGTORF, W. und SERAPHIM, H. P., *Acustica* **11** [1961], 92.
- [15] SERAPHIM, H. P., *Acustica* **8** [1958], 280.
- [16] STEINBERG, J. C. und MUNSON, W. A., *J. Acoust. Soc. Amer.* **8** [1936], 71.
- [17] SERAPHIM, H. P., *Acustica* **11** [1961], 80.
- [18] v. BÉKÉSY, G., *Ann. Phys.* **16** [1933], 844.
- [19] GALAMBOS, R. und DAVIS, H., *J. Neurophysiol.* **6** [1943], 39.
- [20] MILLER, G. A., *J. Acoust. Soc. Amer.* **20** [1948], 160.
- [21] STEIN, H. J., *Acustica* **10** [1960], 116.
- [22] NIESE, H., *Hochfrequ. u. Elakustik* **66** [1958], 115.
- [23] ROBINSON, D. W. und WHITTLE, L. S., *Acustica* **10** [1960], 74.

# RELAXATIONSSCHALLDÄMPFER\*

von G. KURTZE

Grünzweig & Hartmann AG., Ludwigshafen/Rhein

## Zusammenfassung

Die Arbeit befaßt sich mit der Ausnutzung von Relaxationsmechanismen zur Erzielung einer Schalldämpfung in Kanälen. Die Wirksamkeit von Absorptionsdämpfern bisher üblicher Art beruht auf einer Kombination von Schallabsorption durch poröse Materialien und Resonanzeffekten. Zur Erzielung breitbandiger Wirksamkeit eines solchen Dämpfers ist die Hintereinanderschaltung verschieden abgestimmter Elemente erforderlich. Relaxationseffekte haben den Vorteil, daß ihre Wirkung wesentlich breitbandiger ist, so daß der gesamte Schalldämpfer einheitlich aufgebaut werden kann.

Die Relaxationsdämpfung wird dadurch erzielt, daß an den Kanal zusätzliche Volumina über Strömungswiderstände angeschlossen werden. Die untere Grenzfrequenz einer solchen Anordnung ist durch das Produkt aus Strömungswiderstand und Federungswiderstand des Volumens gegeben. Durch geeignete Wahl des Strömungswiderstandes kann also jede gewünschte Grenzfrequenz eingestellt werden, ohne daß deswegen, wie bei Resonanzmechanismen, eine Mindesttiefe der Auskleidung des Kanals erforderlich ist. Das zusätzlich an den Kanal angeschlossene Volumen bestimmt lediglich die Größe der Dämpfung, nicht aber die Grenzfrequenz.

## Sommaire

Ce travail traite de l'utilisation de mécanismes à relaxation pour obtenir l'amortissement du son dans les conduites. L'efficacité des silencieux absorbants, jusqu'alors en usage, provient de ce que l'absorption du son par des matériaux poreux se combine à des effets de résonance. Pour assurer dans une large bande l'efficacité d'un tel silencieux il faut disposer à la suite les uns des autres des éléments syntonisés sur des périodes différentes. Les effets dus à la relaxation ont l'avantage d'être d'une efficacité particulière dans une bande large, ce qui simplifie beaucoup la construction du silencieux tout entier.

L'absorption par relaxation s'obtient en raccordant à la conduite des volumes additionnels par l'intermédiaire de résistances aérodynamiques. La fréquence limite inférieure d'un tel dispositif est donnée par le produit des résistances aérodynamique et capacitive du volume. Par un choix judicieux de la résistance aérodynamique on peut réaliser la fréquence limite désirée sans avoir, comme ce serait le cas dans les mécanismes à résonance, à prévoir une épaisseur minima pour le revêtement de la conduite. Le volume additionnel raccordé à la conduite détermine seulement l'importance de l'amortissement; il n'agit pas sur la fréquence limite.

## Summary

Subject of the paper is the use of relaxation phenomena for the attenuation of sound in ducts. The effectiveness of most absorption attenuators is based on a combination of absorption by porous materials and resonance phenomena. Wide band attenuation can then only be achieved by connecting variously tuned units in series. As against this, relaxation phenomena are advantageous because of their wide band attenuation and allow for a uniform construction of the entire attenuator.

The relaxation attenuation is obtained by connecting the duct with additional volumes via flow resistances. The lower limiting frequency of such damping units is given by the product of flow resistance and compliance of the volume. Any required limiting frequency can thus be obtained by suitable choice of the flow resistance without special demands on the minimum depth of the volume. The size of the additional volume determines only the amount of damping but not its limiting frequency.

## 1. Einführung

Schalldämpfer haben die Aufgabe, die Schallausbreitung in Kanälen aller Art zu unterbinden, oder zu dämpfen. Wir unterscheiden dabei sogenannte Blinddämpfer, die den auftreffenden Schall

zur Schallquelle zurückwerfen, also nicht durchlassen und Absorptionsdämpfer, die den auftreffenden Schall absorbieren. Ein Absorptionsdämpfer ist im Prinzip ein Kanal, der mit schallabsorbierendem Material ausgekleidet ist. Dieser Kanal sollte wenigstens in einer Querschnittsdimension kleiner als die Wellenlänge des zu dämpfenden Schalles sein, da bei größerer Kanalbreite die Dämpfungswirksamkeit

\* Schutzrechte angemeldet.

mit zunehmender Frequenz sehr schnell abnimmt. Es bildet sich dann in der Mitte des Kanals ein Schallstrahl aus, der durch die Wandauskleidung praktisch nicht mehr beeinflusst wird. Zur Erzielung einer großen Dämpfungswirksamkeit sollte die Eingangs-impedanz der Wandauskleidung so klein wie möglich sein. Zwar hat CREMER [1] gezeigt, daß ein kleiner reeller Wandwiderstand mit einer bestimmten Federungskomponente zu größeren Dämpfungen führt als der Wandwiderstand Null; der von CREMER geforderte Wert des Wandwiderstandes ist jedoch für tiefe Frequenzen ebenfalls klein gegen den Wellenwiderstand der Luft und in der Praxis kaum zu realisieren.

Wandwiderstände, die kleiner sind als der Wellenwiderstand der Luft, können nur durch Resonanzmechanismen erzielt werden. Man unterteilt daher die Schluckstoffauskleidung durch Wände, die quer zur Schallausbreitungsrichtung stehen, um eine Schallausbreitung in Längsrichtung zu verhindern, und macht sie eine Viertelwellenlänge ( $\lambda/4$ ) dick. Dieses Verfahren hat zwei wesentliche Nachteile. Einmal wird die erforderliche Dicke der Auskleidung bei tiefen Frequenzen außerordentlich groß, und zweitens wird die gewünschte kleine Eingangs-impedanz nur in einem relativ schmalen Frequenzbereich erzielt, denn bei der doppelten Frequenz, also bei einer Auskleidungstiefe von  $\lambda/2$  ergibt sich ja statt eines kleinen ein sehr großer Widerstand. Die Tiefe der Auskleidung läßt sich reduzieren, wenn man an Stelle von  $\lambda/4$ -Leitungen Resonatoren verwendet, wie zum Beispiel Helmholtz-Resonatoren. Solche Resonatoren sind aber noch schmalbandiger in ihrer Wirksamkeit als die  $\lambda/4$ -Leitungen und werden überdies nicht wie die  $\lambda/4$ -Leitungen bei der dreifachen Frequenz wieder wirksam.

Soll ein Absorptionsdämpfer breitbandig wirksam sein, so sind zunächst einmal Resonanzkammern mit verschiedener Abstimmung erforderlich, damit die jeweils vorhandenen Dämpfungsminima von den Dämpfungsmaxima anderer Resonatoren überdeckt werden. Die große Tiefe der Auskleidung, die für die Erzielung großer Dämpfungswerte bei tiefen Frequenzen erforderlich ist, bedingt zugleich relativ breite, freie Kanäle, wenn nicht das Verhältnis zwischen freiem Kanalquerschnitt und Gesamtquerschnitt des Dämpfers unvernünftig klein werden soll. Große Breite der freien Kanäle ist aber gleichbedeutend mit einer niedrigen, oberen Grenzfrequenz der Wirksamkeit des Dämpfers. Zur Erzielung einer ausreichenden Dämpfung bei hohen Frequenzen muß also ein zweites Dämpfungsregister mit dünneren Kulissen und entsprechend schmalere freien Kanälen nachgeschaltet werden.

Diese Schwierigkeiten, zu denen auch noch eine Reihe von fertigungstechnischen Schwierigkeiten

kommt, lassen sich zum großen Teil umgehen, wenn man an Stelle der Resonanzmechanismen Relaxationsmechanismen für die Absorptionsdämpfung ausnutzt.

Relaxationsmechanismen sind wegen ihrer Breitbandigkeit für diese Zwecke sehr viel geeigneter als Resonanzvorgänge, denn während die Halbwertbreite der Resonanzkurve eines  $\lambda/4$ -Resonators bestenfalls eine halbe Oktave betragen kann, beträgt die Halbwertbreite einer Relaxationskurve 4 Oktaven.

Wie unterscheidet sich nun ein Relaxationsdämpfer von einem Resonanzdämpfer? Äußerlich sind sich beide sehr ähnlich. In beiden Fällen benötigt man ein seitlich an den Kanal angeschlossenes oder im Kanal selbst abgeteiltes zusätzliches Volumen. Während jedoch dieses zusätzliche Volumen beim Resonanzdämpfer mit porösen Materialien gefüllt ist, bleibt es beim Relaxationsdämpfer leer und wird lediglich durch eine poröse Platte oder Folie gegen den Kanal abgegrenzt. Wir haben somit beim Relaxationsdämpfer ein über einen Strömungswiderstand an den Kanal angeschlossenes Volumen, das durch seine Zeitkonstante — das Produkt aus Strömungswiderstand  $R$  und Federung  $F$  des Volumens — eindeutig gekennzeichnet ist. Wie bei allen Relaxationsvorgängen wird man optimale Wirksamkeit dann erwarten, wenn das Produkt  $RF$  aus Strömungswiderstand und Federung gleich der reziproken Kreisfrequenz  $\omega = 2\pi f$  des Schalles im Kanal ist. Man wird ferner erwarten, daß unterhalb dieser genannten Kreisfrequenz, der Relaxationsfrequenz, die Dämpfung mit zunehmender Frequenz linear ansteigt, während sie oberhalb der Relaxationsfrequenz linear abnimmt. Diese Aussage gilt bei allen Relaxationsvorgängen für die Dämpfung je Zyklus, im vorliegenden Fall also für die Dämpfung je Wellenlänge. Da nun für einen Schalldämpfer in der Praxis nicht die Dämpfung je Wellenlänge, sondern die Dämpfung je Längeneinheit interessant ist, ist zu erwarten, daß die Dämpfung zunächst mit steigender Frequenz quadratisch ansteigt und dann oberhalb der Relaxationsfrequenz einen konstanten Wert erreicht.

Die obere Grenzfrequenz der Wirksamkeit eines solchen Dämpfers ist wie beim Resonanzdämpfer ausschließlich durch die Kanalbreite bestimmt.

Der eingangs geschilderte Nachteil der großen Auskleidungstiefe bei tiefen Frequenzen entfällt beim Relaxationsdämpfer. Zur Dämpfung tiefer Frequenzen ist hierbei eine große Zeitkonstante erforderlich, die nun aber an Stelle einer großen Tiefe und damit einer großen Federung des angeschlossenen Volumens ebenso gut durch einen großen Strömungswiderstand erzielt werden kann. Es besteht also keinerlei Notwendigkeit, die zur Absorp-

tion tiefer und zur Absorption hoher Frequenzen vorgesehenen Auskleidungen verschieden tief zu machen.

## 2. Berechnung der erzielbaren Dämpfung

Das geforderte, über einen Strömungswiderstand an den Kanal angekoppelte zusätzliche Volumen kann zum Beispiel in Form einer oder mehrerer Kulissen in den erweiterten Kanal hineingebracht werden, wie das in Bild 1 skizziert ist. Das Kulissenelement II besteht aus zwei porösen Membranen mit dem Strömungswiderstand  $R$ , die im Abstand  $2d_2$  voneinander angeordnet sind. Der Zwischenraum zwischen den Membranen ist in  $x$ -Richtung durch luftdichte Trennwände kassettiert, wobei der Abstand der Trennwände  $a$  kleiner als  $d_2$  und  $d_1$  sein muß. Die Membranen selbst müssen möglichst dünn gehalten werden. Zwischen Kulissenelement und harter Kanalwand ist beiderseits ein Abstand  $d_1$ .

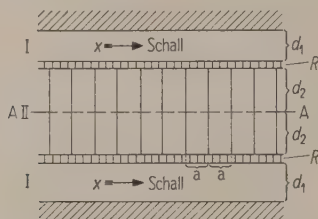


Bild 1. Schnitt durch einen Relaxationsschalldämpfer, bei dem das zusätzliche Volumen in Form einer Kulisse in den Kanal hineingesetzt wurde.

Unter Vernachlässigung der Membrandicke gibt das Verhältnis  $d_1/(d_1 + d_2)$  den freien Kanalquerschnitt an. In  $z$ -Richtung (vergleiche Bild 2) kann die so beschriebene „Elementarzelle“ unter Fortlassung der harten Wände beliebig oft wiederholt werden, so daß Kanäle von  $2d_1$  Breite mit Kulissen von  $2d_2$  Breite räumlich abwechseln.

Für die theoretische Behandlung des so skizzierten Schalldämpfers genügt es, das in Bild 2 skizzierte Querschnittselement zu betrachten, wobei entlang der Linie A—A in Bild 1 eine harte Wand angenommen ist.

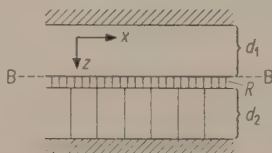


Bild 2. Querschnittselement eines Relaxationsschalldämpfers.

Zur Berechnung von Ausbreitungsgeschwindigkeit und Dämpfung im Kanal wird die Impedanz-

Methode benutzt [2]. Für die dort definierten Impedanzen der beiden Kanalhälften von der Oberfläche der Membran B—B aus gesehen ergeben sich die folgenden Ausdrücke:

Die Impedanz des freien Kanalteiles I kann der genannten Arbeit direkt entnommen werden. Sie ist gegeben durch

$$Z_I = -j \operatorname{ctg} \left( \frac{\omega d_1}{c_0} \sqrt{1 - c_0^2/c^2} \right) \quad (1)$$

Dabei ist  $Z_I$  wie alle im folgenden auftretenden Impedanzen auf den Wellenwiderstand  $\rho c_0$  der Luft bezogen.  $c_0$  ist die Schallgeschwindigkeit in Luft,  $c$  die sich im Kanal einstellende Schallgeschwindigkeit.

Für kleine Argumente ( $d_1 \ll \lambda$ ) ( $\lambda$  = Wellenlänge im Kanal) kann der Cotangens durch das reziproke Argument ersetzt werden und es ergibt sich

$$Z_I = \frac{-j c_0}{\omega d_1 (1 - c_0^2/c^2)} \quad (2)$$

oder, anders geschrieben,

$$Z_I = \frac{1}{(j \omega d_1/c_0 + \omega d_1 c_0/j c^2)} = \frac{1}{(j \omega C_1 + 1/j \omega L)} \quad (3)$$

mit den Abkürzungen:

$$C_1 = d_1/c_0; \quad L = c^2/\omega^2 d_1 c_0. \quad (4)$$

Im elektrischen Ersatzschaltbild entspricht  $Z_I$  also einer Parallelschaltung einer Kapazität  $C_1$  mit einer Induktivität  $L$ .

Die Impedanz  $Z_{II}$  des Kanalteiles II, wiederum von B—B aus gesehen, setzt sich zusammen aus der Impedanz des kassettierten Hohlraumes  $Z'_{II}$ , in dem eine Schallausbreitung in  $x$ -Richtung nicht möglich ist, und dem Strömungswiderstand der Membran  $R$ . Die Eingangsimpedanz des Hohlraumes ist (wiederum für  $d_2 \ll \lambda$ ) gegeben durch

$$Z'_{II} = -j c_0/\omega d_2. \quad (5)$$

An der Trennfläche zwischen Membran und Hohlraum ist die Schallschnelle für beide gleich, so daß die beiden Widerstände in Serie zu schalten sind. Für  $Z_{II}$  ergibt sich mithin

$$Z_{II} = R + c_0/j \omega d_2 = R + 1/j \omega C_2 \quad (6)$$

mit

$$C_2 = d_2/c_0. \quad (7)$$

Im Ersatzschaltbild ist das eine Serienschaltung eines Widerstandes mit einer Kapazität.

Erregt man das Gesamtsystem durch eine vorgegebene Druckverteilung

$$p \sim e^{j\omega t} e^{-j\omega z/c_0} \quad (8)$$

in der Fläche B-B, so ist, wenn entweder  $Z_I$  oder  $Z_{II}$  unendlich wird, die resultierende wirksame Impedanz und damit die Schnelle in  $z$ -Richtung allein durch die jeweils andere, endliche Impedanz gegeben. Daraus folgt zwingend, daß die Gesamtimpedanz  $Z$ , aus der sich  $c$  und die Dämpfung errechnen lassen, durch Parallelschaltung von  $Z_I$  und  $Z_{II}$  erhalten wird:

$$1/Z = 1/Z_I + 1/Z_{II} - j \omega C_1 + 1/j \omega L + 1/(R + 1/j \omega C_2). \quad (9)$$

Es ergibt sich damit das in Bild 3 wiedergegebene Ersatzschaltbild, also ein elektrischer Parallelkreis mit einer mit Relaxations-Verlusten behafteten Kapazität.

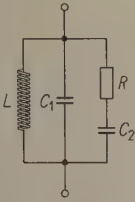


Bild 3. Elektrisches Ersatzschaltbild eines Relaxationsdämpfers.

Der Verlustfaktor der Kapazität läßt sich leicht errechnen. Die Impedanz der Gesamtkapazität  $Z_c$  ist gegeben durch

$$1/Z_c = j \omega C_1 + 1/(R + 1/j \omega C_2). \quad (10)$$

Daraus ergibt sich der Verlustfaktor  $\eta$  gemäß

$$\eta = \text{Re}(Z_c) / \text{Im}(Z_c) = \omega \tau / \left[ 1 + \frac{C_1}{C_2} (1 + \omega^2 \tau^2) \right], \quad (11)$$

wobei  $\tau = R C_2$  die Zeitkonstante des Kanalteiles II, also die Relaxationszeit ist.

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit im Kanal in  $x$ -Richtung ergibt sich aus der Bedingung, daß der Imaginärteil der Gesamtimpedanz  $Z$  verschwinden muß<sup>1</sup>. Hier führt die etwas umständliche Rechnung auf die Bedingungsgleichung

$$1/(\omega C_1 + 1/\omega L) + (1 + \omega^2 \tau^2)/\omega C_2 = 0. \quad (12)$$

Einsetzen von Gl. (4) beziehungsweise (2) und (7) in Gl. (11) und (12) liefert für  $\eta$  und  $c$  die Ausdrücke

$$\eta = \omega \tau / \left[ 1 + \frac{d_1}{d_2} (1 + \omega^2 \tau^2) \right], \quad (13)$$

$$c = c_0 / \sqrt{1 + d_2 / [d_1 (1 + \omega^2 \tau^2)]}. \quad (14)$$

Damit hat  $c$  für tiefe Frequenzen ( $\omega \tau \ll 1$ ) den Wert

$$c_t = c_0 / \sqrt{1 + d_2/d_1}, \quad (15)$$

während für hohe Frequenzen ( $\omega \tau \gg 1$ ) gilt

$$c_h = c_0. \quad (16)$$

Die Dämpfung pro Wellenlänge  $\alpha \lambda$  ist mit  $\eta$  verknüpft durch die Beziehung

$$\alpha \lambda = 8,6 \pi \eta \text{ dB}, \quad (17)$$

so daß man

$$\alpha = 8,6 \pi \eta \omega / 2 \pi c = 4,3 \eta \omega / c \quad (18)$$

erhält.

Einsetzen von Gl. (13) und (14) liefert

$$\alpha = 4,3 \frac{\omega}{c_0} \times \frac{\omega \tau}{\sqrt{\frac{d_1}{d_2} (1 + \omega^2 \tau^2) + \left[ \frac{d_1}{d_2} (1 + \omega^2 \tau^2) \right]^2}} \text{ dB/m}. \quad (19)$$

Als Grenzwert der Dämpfung ergibt sich damit für  $\omega \tau \gg 1$

$$\alpha_{\infty} = 4,3 \frac{d_2}{d_1} \frac{1}{c_0 \tau} \quad (20)$$

und mit  $\tau = 1/2 \pi f_{gr}$ ;  $c_0 = 330 \text{ m/s}$

$$\alpha_{\infty} = 0,08 \frac{d_2}{d_1} f_{gr} \text{ dB/m}. \quad (21)$$

Die Dämpfung bei der Grenzfrequenz  $f_{gr}$  ergibt sich zu ( $\omega \tau = 1$ )

$$\alpha_{gr} = 0,08 f_{gr} \frac{1}{\sqrt{2 \frac{d_1}{d_2} + \left( 2 \frac{d_1}{d_2} \right)^2}} \text{ dB/m}. \quad (22)$$

Die rechnerisch resultierende Dämpfung ist in Bild 4 für verschiedene Werte der Relaxationszeit  $\tau$  und verschiedene freie Querschnitte  $d_1/(d_1 + d_2)$  in

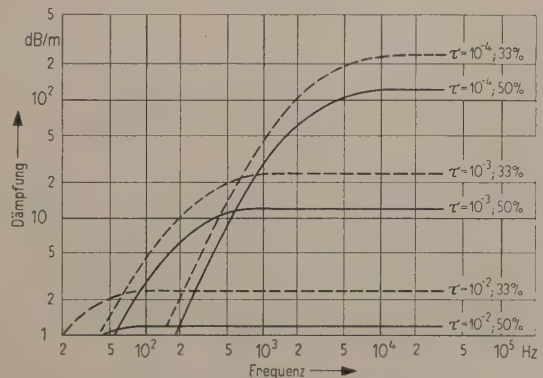


Bild 4. Berechnete Dämpfung als Funktion der Frequenz für verschiedene Relaxationszeiten  $\tau$  und verschiedene freie Querschnitte  $d_1/(d_1 + d_2)$  in %, ohne Berücksichtigung der oberen Grenzfrequenz.

<sup>1</sup> Die strenge Bedingung lautet  $Z = \text{Minimum}$ . Die hier vorgenommene Vereinfachung kommt der Vernachlässigung des Einflusses der Dämpfung auf die Schallgeschwindigkeit gleich.

% als Funktion der Frequenz aufgetragen. Dabei ist der Abfall nach hohen Frequenzen zu nicht berücksichtigt, der eintritt, wenn die Wellenlänge kleiner wird als die Kanalbreite, so daß die Voraussetzungen der Theorie nicht mehr erfüllt sind. Wie bei normalen Absorptionsdämpfern zeigt sich, daß größere Dämpfung bei tiefen Frequenzen (größere Relaxationszeit) mit einem erheblichen Dämpfungsverlust bei hohen Frequenzen erkauft werden muß.

Die in Bild 4 wiedergegebenen berechneten Dämpfungskurven sind inzwischen in vollem Umfang experimentell belegt. Hierüber wird an anderer Stelle berichtet werden.

### 3. Anwendung des Berechnungsverfahrens auf Absorptionsschalldämpfer konventioneller Art

Da sich jeder Absorptionsmechanismus als Relaxationsvorgang beschreiben läßt, müssen die eingangs hergeleiteten Beziehungen auch ganz allgemein auf alle Arten von Absorptionsschalldämpfern anwendbar sein. Schwierigkeiten macht dabei lediglich die Tatsache, daß bei den meisten Dämpfern Strömungswiderstand  $R$  und Federung  $F$  nicht räumlich voneinander getrennt sind. Auf die Federung ist wegen der hohen Porosität der üblichen Schluckstoffe diese Tatsache ohne Einfluß. Für den Strömungswiderstand muß jedoch gegebenenfalls ein „effektiver Widerstand“  $R$  zunächst berechnet werden.

Auch die von CREMER [1] beschriebenen Kammerdämpfer, bei denen die dämpfungswirksame Auskleidung aus schwach gedämpften  $\lambda/4$ -Resonatoren besteht, lassen sich auf diese Weise berechnen. Wegen der nahezu  $\lambda/4$ -dicken Auskleidung ist dann allerdings die in Gl. (5) vorgenommene Vereinfachung nicht mehr zulässig. Eine nachträgliche Korrektur ist hier jedoch leicht dadurch möglich, daß man  $d_2$  als die „effektive Schichtdicke“ der Auskleidung auffaßt, gegeben durch

$$d_2 = \frac{c_0}{\omega} \operatorname{tg} \frac{\omega}{c_0} d_2', \quad (23)$$

wobei  $d_2'$  die tatsächliche Schichtdicke ist. Für  $d_2 \ll \lambda$  stimmen beide überein.

In dieser Betrachtungsweise besteht der Vorteil des Kammerdämpfers darin, daß bei einer Auskleidungstiefe von nahezu  $\lambda/4$  die effektive Schichtdicke  $d_2$  und damit nach Gl. (20) die Dämpfung sehr groß wird. Dieser Vorteil ist aber damit erkauft, daß die Breitbandigkeit verlorengeht, denn die große effektive Schichtdicke wird nur in einem sehr schmalen Frequenzbereich erzielt. Zur Erzielung breitbandiger Dämpfung müssen mehrere verschiedenen abgestimmte Dämpferkammern räumlich getrennt voneinander Verwendung finden.

Wegen der Schmalbandigkeit der Kammerdämpfer muß die Relaxationszeit so eingestellt werden, daß die Dämpfung bei einer bestimmten Frequenz ein Maximum hat. Differentiation von Gl. (13) ergibt die Bedingung

$$\omega \tau = 1 + d_2/d_1, \quad (24)$$

$$\text{also} \quad R C_2 = \frac{1}{\omega} (1 + d_2/d_1). \quad (24a)$$

In der Praxis läßt sich ein effektiver Strömungswiderstand, der kleiner ist als  $0,5 \rho c$  kaum realisieren. Nimmt man diesen Grenzwert als Beispiel an, dann ergibt sich für eine Frequenz von 200 Hz und eine Kanalbreite von 5 cm eine effektive Schichtdicke von  $d_2 = 550$  cm (tatsächliche Schichtdicke  $\lambda/4 = 42$  cm). Mithin wird  $d_2/d_1 = 110$ . Nach Gl. (24) ist dabei  $\tau = 0,008$  zu setzen, so daß sich nach Gl. (20) eine Dämpfung von maximal etwa 175 dB/m ergibt. Dieser Wert steht in guter Übereinstimmung mit der praktischen Erfahrung [3].

Nach Gl. (15) beträgt die Schallgeschwindigkeit für diesen Fall nur etwa  $c_0/10$ , das heißt bei 200 Hz ist die Wellenlänge 17 cm. Damit die Voraussetzungen erfüllt sind, darf daher der Abstand der Trennwände zwischen den Kammern höchstens 2 cm betragen.

Die Frage, ob man bei Verwendung von Kammerdämpfern bei gleicher breitbandiger Dämpfung mit einem geringeren Dämpfervolumen auskommt als bei einfachen Relaxationsdämpfern, läßt sich theoretisch schwer beantworten. Unterhalb der Resonanzfrequenz fällt die Dämpfung sehr schnell ab, da nicht nur der Widerstand zu klein wird, sondern außerdem auch die effektive Kammertiefe und damit die Federung  $F$  schnell abnimmt. Die Relaxationszeit  $\tau = R F$  sollte aber bei tiefen Frequenzen größer sein. Bei höheren Frequenzen gilt  $\lambda/4 < d_2 < \lambda/2$ , das heißt die Eingangsimpedanz der Auskleidung hat Massencharakter und die Dämpfung nimmt aus diesem Grund ab. Die eben genannten, sehr hohen Dämpfungswerte können also nur in einem sehr schmalen Frequenzbereich erzielt werden. Zwar wird bei  $d_2 = 3 \lambda/4, 5 \lambda/4 \dots$  die Federung wieder sehr groß, doch hat dann der Strömungswiderstand nicht mehr den optimalen Wert.

Die Praxis zeigt, daß die erforderlichen Volumina in beiden Fällen etwa gleich sind, so daß der Relaxationsdämpfer wegen seines einfacheren Aufbaues vorzuziehen wäre. Interessant ist, daß beim Relaxationsdämpfer für gleiche Forderungen (freier Querschnitt, Frequenzbereich, Dämpfung) stets das gleiche Dämpfervolumen erforderlich ist, gleichgültig ob man den Dämpfer kurz und breit oder lang und schmal auslegt.

Wenn in dieser Arbeit zur Berechnung der Dämpfung die Impedanzmethode angewendet wurde, so

geschah das, um zu zeigen, daß dieses für einen ganz anderen Zweck entwickelte Verfahren [4] auch hier rein schematisch angewendet werden kann. Der sich im vorliegenden Fall ergebende Rechnungsgang ist weitgehend identisch mit den Herleitungen von CREMER [1] bzw. MORSE [5].

(Eingegangen am 17. November 1960.)

#### Schrifttum

- [1] CREMER, L., *Acustica* 3 [1953], 249.
- [2] KURTZE, G. und BOLT, R. H., *Acustica* 9 [1959], 238.
- [3] GERBER, O., *Acustica* 3 [1953], 264.
- [4] KURTZE, G., *J. Acoust. Soc. Amer.* 9 [1959], 1183.
- [5] MORSE, P. M., *J. Acoust. Soc. Amer.* 11 [1939], 205.

## LETTERS TO THE EDITORS

### Steuerbare elektrische Tastenstruktur für Orgeln

In letzter Zeit werden in Deutschland Orgeln vorzugsweise mit Schleifladen und mechanischer Traktur ausgestattet. Bei größeren Instrumenten wird hin und wieder eines der elektropneumatischen Systeme angewandt, die jedoch den Nachteil haben, keine konforme Übertragung der Tastenbewegung auf das Ventil zu ermöglichen und gewisse Verzögerungen zwischen Tastenanschlag und Ventilbewegung zu besitzen. [1].

Erfahrungsgemäß wird von den meisten Organisten jenem Traktursystem der Vorzug gegeben, das eine Beeinflussung der Pfeifenansprache vom Spieler her ermöglicht. So wie ein Flötist verschiedene Arten des Ansatzes anwendet, um unterschiedliche, der Komposition gemäße Artikulationen zu erzielen, so sollte es dem Organisten möglich sein, die Pfeifen nach phrasierungstechnischen Gesichtspunkten ansprechen zu lassen. Wie frühere Untersuchungen zeigten [2], ist dies auf Orgelpositiven und kleineren Orgeln möglich, während es sich bei großen Orgeln oftmals nicht erreichen läßt, vor allem, wenn die mechanische Verbindung zwischen Taste und Ventil lang und verwinkelt ist. In diesen Fällen verhindert ein deutlicher Druckpunkt, daß der Finger die Taste mit kontrollierter Geschwindigkeit herabdrückt [3], [4]. Der Druckpunkt hat seine Ursache darin, daß auf dem geschlossenen Ventil zusätzlich zur Federkraft der Winddruck lastet. Beim Anschlag spannt der Finger zunächst das Gestänge der Abstrakten so lange an, bis er an einem gewissen Punkt, eben dem Druckpunkt, die Kraft der Feder und die des Winddrucks überwindet. Hat er das Ventil nur ein wenig geöffnet, so entfällt die Komponente des Winddrucks, und dem Finger wirkt nur noch die Federkraft entgegen. Schwierigkeiten ergeben sich dadurch, daß die Abstrakten durch Temperatur- und Feuchtigkeitsänderungen beeinflußt werden und daß in manchen Fällen die Reibungsverluste das erträgliche Maß übersteigen.

Aus diesen Gründen wurde eine neuartige rein elektrische Traktur ausgearbeitet, bei welcher die Vorteile der mechanischen Traktur gewahrt, ihre Nachteile aber vermieden sind. Bei dem neuen System [5] ist mit der Taste ein Widerstand verbunden, dessen Größe beim Herunterdrücken stetig abnimmt (Bild 1). Mit dem Widerstand ist eine Spannungsquelle und ein Elektromagnet der im Orgelbau üblichen Form verbunden, dessen Anker das Ventil der Lade betätigt. Allerdings sind dafür die üblichen Schleifladen-Klapp-Ventile nicht geeignet, auch versagen alle Ventilarten, welche einen Druckpunkt besitzen. Der Grundgedanke der neuen Methode ist nämlich der, daß jeder Stellung des Tastenwiderstandes eine Ventilstellung entspricht, daß also

bei großem Anfangswiderstand der Anker nur wenig, bei kleinem Endwiderstand stark anzieht. Durch eine Feder am Ventil wird erreicht, daß es in jeder Lage im Gleichgewicht mit der Anzugskraft des Magneten ist.

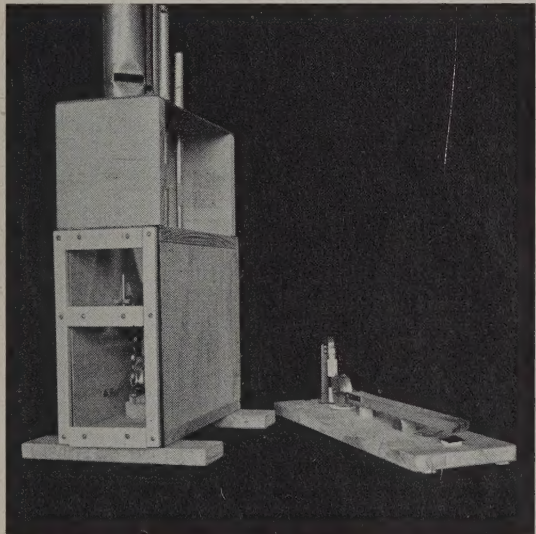


Bild 1. Versuchsmodell der elektrischen Traktur.

Zur Vermeidung des Druckpunktes eignen sich u. a. Schieberventile. Besonders gute Erfahrungen wurden mit einem einschlagenden Klapp-Ventil gemacht, wie es in dem Modell (Bild 1) verwendet ist. Man erkennt die vordere Kante des Ventils, das durch eine Feder von oben angedrückt wird. Der unten angebrachte Magnet zieht den Anker an, der seinerseits gegen das Ventil drückt und es anhebt. Die akustische Wirksamkeit des Verfahrens ist in den Bildern 2 und 3 gezeigt. Auf die Versuchslade wurde eine c'-Pfeife des Registers Rohrflöte gesetzt und das Einschwingen bei schnellem und langsamem Tastenanschlag registriert (Bild 2). Man sieht die zeitliche Entwicklung der Amplituden in den Oktavbereichen (Zeitmarke 20 ms), in der obersten Zeile ist der Vorgang im gesamten Frequenzbereich wiedergegeben (50 bis 10 000 Hz). Der Vergleich der beiden bei gleicher Verstärkung aufgenommenen Bilder zeigt, daß bei schnellem Anschlag ein deutlicher Vorläuferton (beziehungsweise Geräusch) in der 4. bis

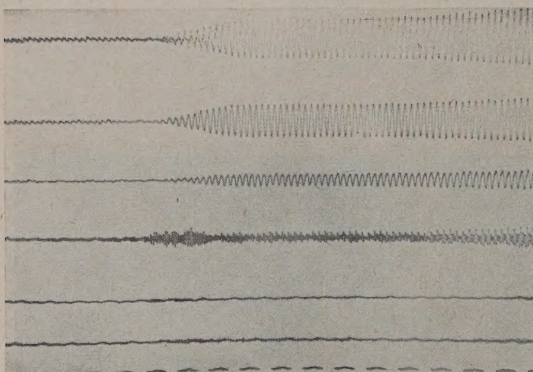
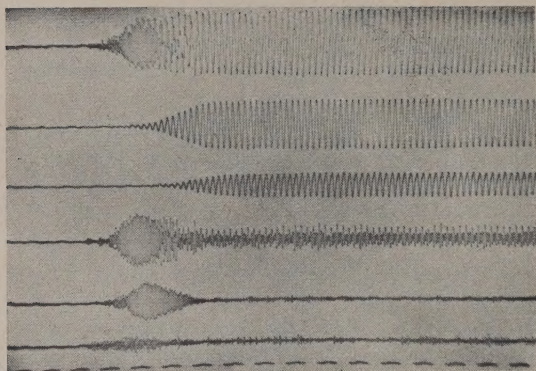


Bild 2. Oktavsieb-Oszillogramme des Einschwingens einer Rohrflöte c :

oben: Taste schnell angeschlagen,  
unten: Taste langsam angeschlagen.

6. Zeile (600–1200–2400–4800 Hz) auftritt, der nach 40 ms bereits wieder abgeklungen ist, während der Grundton einschwingt. Dagegen ist bei langsamem Anschlag nur ein sehr schwaches Vorläufergeräusch in der 4. Zeile zu erkennen, wobei die höherfrequenten Geräuschanteile sogar geringer sind als bei schnellem Anschlag.

Ähnlich vollzieht sich das Einschwingen eines aus Prinzipal 8', Oktave 4', Quinte 2<sup>2</sup>/<sub>3</sub>', Oktave 2' und Quinte 1<sup>1</sup>/<sub>3</sub>' gebildeten Plenums (Bild 3). Bei schnellem Anschlag entwickeln sich die Teiltöne derart, daß zunächst die höherfrequenten Komponenten, wenig später die Oktavteiltöne und Grundtöne erscheinen. Völlig verschieden davon ist das Einschwingen bei langsamem Anschlag der Taste. In diesem Falle treten zuerst nur schwache höherfrequente Komponenten auf, und alle Teiltöne nehmen in ihrer Amplitude relativ langsam zu.

Während man also in beiden Beispielen bei schnellem Anschlag eine Präzisierung des Anschlagsmoments

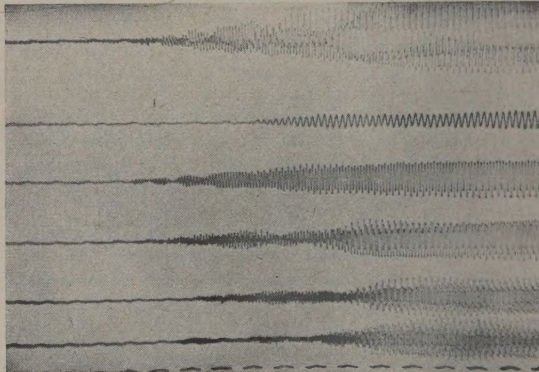
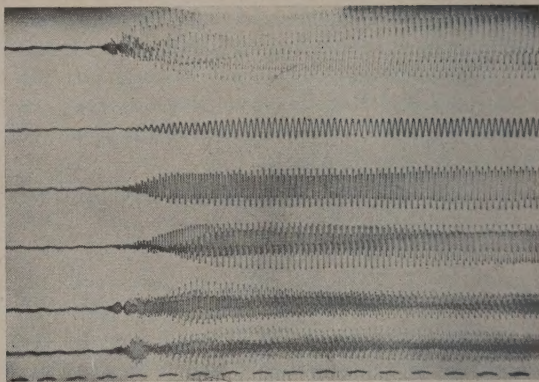


Bild 3. Oktavsieb-Oszillogramme des Einschwingens eines Plenums c' :

oben: Taste schnell angeschlagen,  
unten: Taste langsam angeschlagen.

durch höherfrequente Anteile bekommt, fallen diese bei langsamem Anschlag fort, so daß ein weicher Toneinsatz erzielt wird.

(Eingegangen am 2. Dezember 1960.)

W. LOTTERMOSER, J. MEYER  
Physikalisch-Technische Bundesanstalt  
Braunschweig, Bundesallee 100

#### Schrifttum

- [1] LINHARDT, W., Dissertation TH Braunschweig 1960.
- [2] LOTTERMOSER, W., Beitrag in „Klangstruktur der Musik“. Verlag für Radio-Foto-Kinotechnik, Berlin 1955.
- [3] TISCHLER, A., Das Musikinstrument 9 [1960], 542.
- [4] KERN, E. und GLATTER-GÖTZ, J. v., Walcker Hausmittel. 24 [1960], 8.
- [5] DBP a. L 35 108 IX/51 a.

Measurement of Reverberation Time in "Göteborgs konserthus"

Under the direction of S. INGEMANSSON, "Chalmers Tekniska Högskola, Inst. för akustik", measurements of Reverberation time have been done in "Göteborgs konserthus".

This concert hall was built in 1935. The architecture was designed by N. E. ERIKSSON.

It is known as one of the most outstanding concert halls in the world, in acoustical aspects. Walls and ceiling are made of wood and the hall can accommodate about 1.350 persons. The influence of the audience was studied by measuring the R.T. with and without an audience.

The measurement with the hall empty was taken on 28th March 1960 and both "warble-tone" and pistol shots as sources of sound were used. To find if the R.T. was dependent on the position of the microphone 6 positions were taken using the "warble-tone". Little variation was found, and therefore only two representative positions with pistol shots were chosen.

Fig. 1 shows that there is rather good agreement between the curves obtained from these two methods. The differences are in accordance with the theories of FURRER and LAUBER [1] and KEIBS and KÜHL [2].

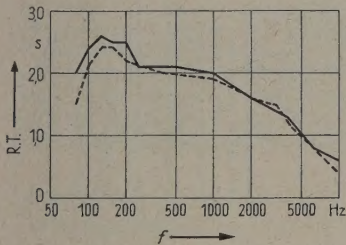


Fig. 1. Concert hall empty, relative humidity 31.5%.

———— Shots,  
----- Warble tone.

The measurements in the hall with an audience and orchestra (about 1000 persons) took place on 16th June 1960. This time shots only were used. The results are shown in Fig. 2.

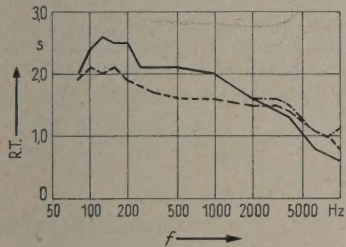


Fig. 2. Shot method.

———— Concert hall empty, 31.5% relative humidity,  
----- Concert hall empty, reduced to 61.5% relative humidity,  
..... Concert hall occupied, 61.5% relative humidity.

From Fig. 2 we find that measured R.T. at high frequencies is shorter without than with an audience. This depends on the relative humidity which was not the same on both occasions. Without an audience we

have a relative humidity of 31.5% and with an audience 61.5%. The values of R.T. obtained with the hall empty has been reduced to 61.5% relative humidity. Diagrams supplied by KNUDSEN and HARRIS [3] and EVANS and BAZLEY [4] have been used. In our calculations the EVANS and BAZLEY diagram gave the most probable results. From Fig. 2 we see that the R.T. of the empty hall is now longer than that of the occupied hall over the whole frequency range.

At 500 Hz we have

$$\begin{aligned} \text{R.T. empty} &= 2.1 \text{ s.} \\ \text{R.T. occupied} &= 1.6 \text{ s.} \end{aligned}$$

The well-known SABINE formula of calculating the R.T. is

$$T_{500 \text{ Hz}} = 0.049 \frac{V}{s \bar{a}} \text{ (ft-system).}$$

It is then necessary to know the absorption of the audience. The most convenient method of obtaining this is to take the absorption per person and multiply by the number of persons. That is to assume a proportionality between absorption and number of persons.

BERANEK [5] however uses an absorption coefficient, which when multiplied by the area occupied by the audience gives the total absorption; that is to say the total absorption is independent of the number of persons present in the area.

In the calculations both methods have been used to obtain the R.T. with the hall occupied.

The absorption coefficient 0.06 was used for walls, ceiling and floor. In the standard method the absorption 4.5 Sab (ft<sup>2</sup>) per person was used resulting in R.T. 2.4 s.

In BERANEK's method the absorption coefficient 0.96 for the audience was used, giving a R.T. of 1.7 s. This value is very near the experimental value of 1.6 s.

In order to find the optimal R.T. KÜHL [6] has made a large scale test. He found that the optimal R.T. was independent of the volume of the room, but dependent upon the character of the music.

For classical and modern music he obtained R.T. = 1.5 s and for romantic music 2.1 s. He also found the most favourable compromise for different musical styles is a time of 1.7 s.

Using the above results the R.T. has an extremely favourable value in "Göteborgs konserthus".

(Received 12th December, 1960.)

S. BERLIN and R. FRIBERG  
Chalmers Tekniska Högskola,  
Institutionen för akustik,  
Göteborg

References

- [1] FURRER, W. and LAUBER, A., J. Acoust. Soc. Amer. 25 [1953], 90.
- [2] KEIBS, L. und KÜHL, W., Acustica 9 [1959], 365.
- [3] KNUDSEN and HARRIS, Acoustical Designing in Architecture, New York 1950.
- [4] EVANS, E. J. and BAZLEY, E. N., Acustica 6 [1956], 238.
- [5] BERANEK, L., J. Acoust. Soc. Amer. 32 [1960], 661.
- [6] KÜHL, W., Acustica 4 [1954], 618.

## Zu den Bemühungen um den Norm-Stimmton

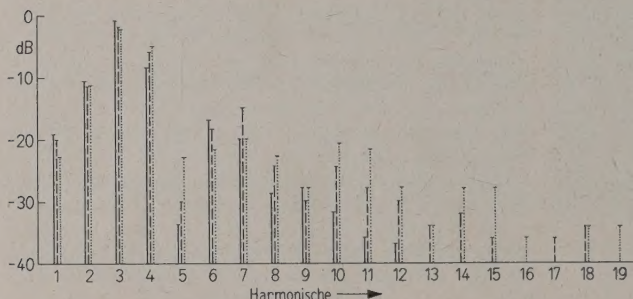
Die Nichteinhaltung des Normstimmtones (440 Hz), trotz internationaler Empfehlungen, durch die Klangkörper des Rundfunks führt im Aufnahmebetrieb immer häufiger zu Schwierigkeiten.

Eine neuere Ermittlung [1] der durchschnittlichen Stimmung der Rundfunkorchester im Funkhaus des Deutschen demokratischen Rundfunks, Berlin-Oberschöneweide, brachte unter anderem folgende Ergebnisse:

Sinfonieorchester	445 Hz,
Großes Orchester	444 Hz,
Tanzstreicherorchester	445 Hz,
Tanzorchester	443 Hz.

(Dagegen besaß ein neu importiertes Vibraphon aus England eine Stimmung von  $a^1 = 440$  Hz!)

Diese alarmierenden Werte, die gegenüber Angaben aus früheren Untersuchungen (zum Beispiel [2]) angestiegen waren, zeigen die Notwendigkeit, daß vor allem der Rundfunk die Arbeiten des Deutschen Stimmtonausschusses unterstützen muß.

Bild 1. Oboenspektrum  $a^1$ .

—	piano	70 phon,
- - -	mezzoforte	75 phon,
· · · · ·	forte	80 phon.

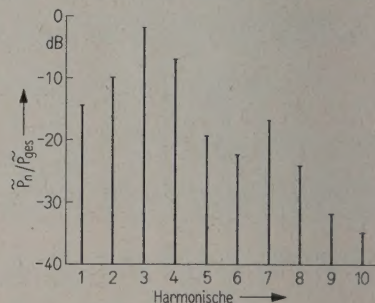
Zur Einhaltung des Normstimmtones müssen leicht bedienbare und transportable Stimmgeräte bereitgestellt werden, um Musiker und Instrumentenstimmer von fraglichen „Normalien“ wie Oboe, unkontrollierten Stimmgabeln usw. unabhängig zu machen. Zur Entwicklung eines eigenen Stimmtongenerators, der die Grundlage zu weiteren Bemühungen um die Einhaltung des Normstimmtones beim Rundfunk bilden soll (eventuell unter Inanspruchnahme eines entsprechenden Gesetzes), wurden im Betriebslaboratorium für Rundfunk und Fernsehen, Berlin-Adlershof, einige Untersuchungen durchgeführt, über die in [1] ausführlich berichtet wird. Dabei wurde vor allem der Zusammenstellung des Spektrums desjenigen Klanges besondere Aufmerksamkeit gewidmet, der am günstigsten zum Stimmen geeignet zu sein scheint. Hierzu wurden einige Messungen mit Klangkörpern, aber auch an Oboen (um neuere Werte der Abstrahlcharakteristik zu erhalten), durchgeführt.

Bild 1 zeigt zum Beispiel ein aufgenommenes Spektrum des  $a^1$  für 3 Lautstärkegrade (gemessen unter  $0^\circ$  im schalltoten Raum; Abstand vom Meßmikrofon MM2 1,5 m). Ein elektronischer Stimmtongeber,

der von einer Stimmgabel synchronisiert wird, wurde als Einschubkonstruktion entwickelt, um sowohl im Schaltraum der Funkhäuser (zur Verteilung in die einzelnen Studios) als auch transportabel in Kofferform (mit einem zusätzlichen Lautsprecher versehen) bei Außenübertragungen und -aufnahmen eingesetzt werden zu können. Er liefert +6 dB-Pegel und besitzt eine Unsicherheit der Stimmtongfrequenz  $< 5 \cdot 10^{-4}$ . (Wichtig ist dabei ein geringer Temperaturkoeffizient der Stimmgabel; der des dazu benutzten Spezialstahles beträgt  $TK < 2 \cdot 10^{-5}/^\circ C$ .)

Als geeignetes Spektrum für derartige Stimmtonggeber wird eines gemäß Bild 2 empfohlen.

Der Einsatz von zunächst etwa 10 derartigen Stimmtonggebern soll zeigen, ob die Behauptungen einzelner Musiker (vorwiegend Bläser) berechtigt sind, daß sie durch früher vorgenommene Änderungen an den Instrumenten die vorgeschriebene Tonhöhe (440 Hz) nicht mehr einstimmen können. Dies wird von Instrumentenbauern überprüft werden. Dann erst werden realere

Bild 2. Vorschlag für ein Spektrum für Stimmtonggeneratoren (Toleranzen der einzelnen Harmonischen  $\pm 3$  dB).

Vorstellungen über die aufzubringenden Neuinvestitionen bestehen, die bereitgestellt werden müssen, wenn man ein Gesetz zur Einhaltung des Stimmtones erwägt.

Durch den Bau und die teilweise Anwendung von Stimmtonggebern sowie durch die Ausstrahlung des Kammertones über den Rundfunk wird versucht werden, die Musiker für die Notwendigkeit und die Vorteile des Stimmtones zu interessieren, damit sie sich endlich in ihrer überwiegenden Mehrheit entschließen, die 440 Hz-Norm anzuwenden und weiterem Höbertreiben der Stimmung entgegenzutreten.

(Eingegangen am 3. Januar 1961.)

G. STEINKE

Betriebslaboratorium für Rundfunk und Fernsehen  
Berlin-Adlershof

## Schrifttum

- [1] STEINKE, G., Einige Untersuchungen zum Stimmtongproblem. Techn. Mitt. des Betriebslab. f. Rundf. u. Fernsehen (BRF) (1960), H. 4.
- [2] LOTTERMOSER, W. und VON BRAUNMÜHL, H. J., Beitrag zur Stimmtongfrage. Acustica 5 [1955], 92.